

CARLOS AURÉLIO NADAL

**MÉTODO DA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL
APLICADO À ENGENHARIA DE PRECISÃO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Grauação
em Ciências Geodésicas da Universidade
Federal do Paraná para obtenção do grau de
Doutor.

Orientador:
Prof. Dr. Silvio Rogério Correa de Freitas

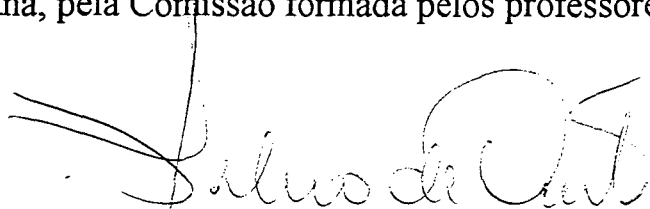
CURITIBA
2000

**“INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL APLICADA À
ENGENHARIA DE PRECISÃO”**

POR

CARLOS AURÉLIO NADAL

Tese nº 016 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



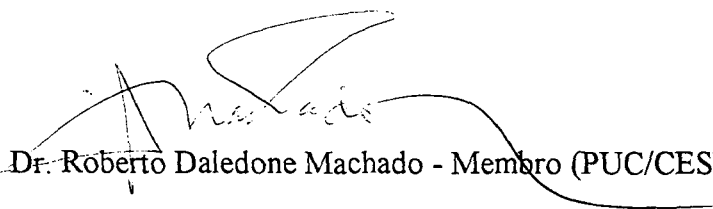
Prof. Dr. Silvío Rogério Correia de Freitas - Orientador e Presidente (UFPR)



Prof. Dr. Valdemar Antonio Demétrio - Membro (ESALQ/USP)



Prof. Dr. Nicola Paciléo Neto - Membro (POLI-USP)



Prof. Dr. Roberto Daledone Machado - Membro (PUC/CESEC)



Prof. Dr. Camil Gemaël - Membro (UFPR)

Profª. Drª. Cláudia Pereira Krueger – Membro Suplente (UFPR)

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos Professores:

Camil Gemaël,
Alvaro Doubek,
Fernando Hatschbach
e
José Bittencourt de Andrade

Pensando em Astronomia, Geodésia, Fotogrametria e Topografia,
idealizaram o Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPr.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não teria sido possível sem a contribuição de muitas pessoas e instituições:

- A Universidade Federal do Paraná;
- Ao Departamento de Geomática da UFPr;
- Ao meu orientador Prof. Silvio Rogério Correa de Freitas;
- Aos meus colegas Professores: Pedro Luis Fagion e Luis Augusto Koenig Veiga e Mauro Lacerda Santos Filho pelo auxílio nos experimentos;
- Aos estudantes de Engenharia Cartográfica: Marlos, Andrea, Daniel e Rodrigo, bolsistas do Laboratório de Aferição pela ajuda nas observações;
- Ao estudante do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas Eno Darci Saatkamp pela colaboração nas observações de temperatura;
- Aos funcionários do LAME João Carlos Alves e Eng. Cintia Ribeiro pelo auxílio no experimento com vigas;
- Aos meus colegas do Departamento de Geomática que incentivaram-me na obtenção deste título;
- A empresa Manfra e Cia Ltda pelo empréstimo de instrumentos de última geração, utilizados no trabalho;
- A minha esposa, companheira de todos os momentos deste trabalho Eng. Katia Juliano Nadal e aos meus filhos Marco, Mateus, Karla e Laura pelos bons momentos da vida.

SUMÁRIO

	página
SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS, GRÁFICOS E QUADROS.....	VII
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
 CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	 1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3 LOCALIZAÇÃO DOS TRABALHOS.....	5
1.4 METODOLOGIA APLICADA.....	5
1.4.1 TRABALHOS DE CAMPO DE LABORATÓRIO.....	5
1.4.2 TRABALHOS DE ESCRITÓRIO.....	7
 CAPÍTULO II – SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS EM ENGENHARIA.....	 8
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 SISTEMA DE REFERÊNCIA TERRESTRE.....	11
2.3 SISTEMA GEODÉSICO DE REFERÊNCIA.....	13
2.4 SISTEMA LOCAL DE REFERÊNCIA.....	17
2.5 SISTEMAS DE COORDENADAS INSTRUMENTAIS.....	19
2.6 TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS.....	21
2.7 OBSERVAÇÕES UTILIZADAS NO TRABALHO E SEUS ERROS	23
 CAPÍTULO III – ENGENHARIA DE PRECISÃO.....	 33
3.1 O POSICIONAMENTO INDUSTRIAL.....	33
3.2 SISTEMAS DE MEDIÇÕES INDUSTRIAIS.....	36
3.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDUSTRIAL DA UFPR.....	40
3.4 PILARES E TRIPÉS UTILIZADOS NO STPI.....	41
3.5 ALVOS TOPOGRÁFICOS DESENVOLVIDOS PARA O STPI.....	45
3.6 ALVOS GRAVADOS EM PLACA DE CRISTAL UTILIZADOS NO STPI PARA DETERMINAÇÃO DE ACURÁCIA DO SISTEMA.....	49
3.7 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS NO STPI.....	51
3.7.1 MIRA HORIZONTAL DE INVAR.....	51
3.7.2 ESTAÇÕES TOTAIS.....	53
3.8 QUALIDADE EXIGIDA NOS TRABALHOS DE TOPOGRAFIA INDUSTRIAL	54
3.9 UTILIZAÇÃO DO STPI NESTA PESQUISA.....	55
 CAPÍTULO IV – O MÉTODO DA INTERSEÇÃO À VANTE TRIDIMENSIONAL.....	 56
4.1 INTRODUÇÃO.....	56

4.2 PRINCÍPIOS DO MÉTODO DE INTERSEÇÃO À VANTE TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO TEODOLITOS OU ESTAÇÕES TOTAIS.....	57
4.3 PROJETO DE LEVANTAMENTO INDUSTRIAL.....	58
4.4 DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÕES UTILIZANDO INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.....	59
4.5 PROCESSO DE CÁLCULO DE UMA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.....	64
4.6 ANÁLISE DE DADOS DE UMA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.....	71
CAPÍTULO V – APLICAÇÕES E ENSAIOS COM O MÉTODO DESENVOLVIDO.....	79
5.1 INTRODUÇÃO.....	79
5.2 PRÉ-ANÁLISE PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS CENTROS ÓPTICOS DE DOIS TEODOLITOS.....	80
5.3 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS CENTROS ÓPTICOS DE DUAS ESTAÇÕES TOTAIS.....	83
5.4 TESTE DE ACURÁCIA COM ALVOS GRAVADOS NA PLACA DE CALIBRAÇÃO.....	86
5.5 ESTUDOS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA EM AMBIENTE INDUSTRIAL.....	88
5.6 DETERMINAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DE ALVOS FIXADOS EM UMA VIGA DE AÇO EM FUNÇÃO DE CARGAS NELA APLICADAS.....	94
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	108
6.1 QUANTO AOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA UTILIZADOS.....	108
6.2 QUANTO A TOPOGRAFIA INDUSTRIAL.....	108
6.3 QUANTO AO DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS E INSTRUMENTOS	109
6.4 QUANTO AO MÉTODO DA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.....	109
6.5 QUANTO AOS EXPERIMENTOS.....	110
6.6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ADICIONAIS.....	116

LISTA DE FIGURAS

	página
Figura 2.1	Sistema geodésico local de referência 15
Figura 2.2	Sistema local de referência 18
Figura 2.3	Sistema de coordenadas instrumentais 20
Figura 2.4	Transformação entre sistemas geodésicos 22
Figura 2.5	Erro de curvatura 30
Figura 3.1	Esquema estrutural de um pilar da base de aferição da UFPr 43
Figura 3.2	Esquema do tripé utilizado em topografia industrial 44
Figura 3.3	Pilar pertencente à base de aferição 46
Figura 3.4	Tripé desenvolvido para o STPI 46
Figura 3.5	Protótipo de um alvo topográfico 47
Figura 3.6	Esquema dos alvos na placa de calibração 50
Figura 4.1	Princípio da Interseção Óptica Tridimensional 60
Figura 4.2	Detalhes dos rebatimentos da interseção óptica tridimensional 61
Figura 4.3	Região utilizável em um levantamento por interseção óptica tridimensional 63
Figura 4.4	Interseção óptica tridimensional - particularidades 66
Figura 4.5	Projeções dos raios de interseção 70
Figura 5.1	Croqui do levantamento 80
Figura 5.2	Planta do Laboratório de Aferição evidenciando os pontos ocupados com os sensores de temperatura 89
Figura 5.3	Esquema e dimensões em metros da viga de aço ensaiada 95
Fotografia 5.1	Disposição das estações totais e dos sensores térmicos durante o levantamento no LAME 96
Fotografia 5.2	Disposição das estações totais em relação à viga de aço ensaiada 96
Fotografia 5.3	Detalhe da viga de aço sendo ensaiada 98
Figura 5.4	Relatório do Ensaio do LAME 106

LISTA DE TABELAS, GRÁFICOS E QUADROS

Quadro 2.1	Erros sistemáticos em observações de direções	25
Quadro 3.1	Metrologia Industrial	34
Gráfico 3.1	Principais relações inerentes ao monitoramento e campos de aplicação	37
Quadro 3.2	Dimensões de um alvo	49
Quadro 3.3	Distâncias calibradas entre os alvos	50
Quadro 3.4	Calibração da mira horizontal de ínvar	52
Quadro 3.5	Dados técnicos de precisão das estações totais	53
Quadro 5.1	Observações efetivadas dia 02/02/1999	84
Quadro 5.2	Resultados dos testes de determinação de distâncias entre estações totais	86
Quadro 5.3	Resultados das comparações efetivadas com alvos gravados na placa de calibração	87
Gráfico 5.1	Variação da temperatura em 36h de monitoramento no Laboratório de Aferição	90
Gráfico 5.2	Variação do gradiente vertical de temperatura no Laboratório de Aferição climatizado	91
Gráfico 5.3	Variação do gradiente vertical de temperatura no Laboratório de Aferição com fonte anômala de calor	91
Gráfico 5.4	Variação de uma direção horizontal e uma direção vertical em função da variação de temperatura	92
Gráfico 5.5	Variação de temperatura induzida pela fonte anômala nas proximidades do alvo	93
Quadro 5.4	Resultado das observações à viga de aço (parte 1)	100
Quadro 5.4	Resultado das observações à viga de aço (parte 2)	101
Quadro 5.4	Resultado das observações à viga de aço (parte 3)	102
Gráfico 5.6	Resultado do ensaio de flexão da viga de aço utilizando o STPI	103
Gráfico 5.7	Resultado do ensaio de flexão da viga de aço utilizando o nível NI003	103
Gráfico 5.8	Diferenças entre a utilização do STPI e do nível NI003	104
Gráfico 5.9	Valores teóricos calculados	104
Gráfico 5.10	Diferença entre os valores observados dos deslocamentos e os valores teóricos	105
Gráfico 5.11	Comparações entre os deslocamentos nos pontos com a viga sem carga e com carregamento de 50995N	107
Gráfico 5.12	Comparação entre os deslocamentos nos pontos observados com a viga sem e com carregamento de 50995 N	107

RESUMO

A Engenharia de Precisão é uma especialidade sugerida pela Associação Internacional de Geodésia (IAG), considerando aspectos teóricos e aplicados relacionados com a grande exigência de acurácia, técnicas de medidas, processamento de dados e modelagem associados a levantamentos cujos objetivos principais são o posicionamento, controle, locação, implantação e mensuração relacionados a obras e projetos de Engenharia. Este trabalho, foi inserido neste contexto, com o objetivo da obtenção de coordenadas cartesianas tridimensionais de pontos topográficos com alta precisão, através da utilização do método da interseção óptica tridimensional.

O método da interseção óptica tridimensional consiste na obtenção simultânea dos cossenos diretores de duas direções espaciais, materializadas por estações totais ou teodolitos, sendo conhecida a distância entre os centros ópticos dos dois instrumentos que é utilizado como escala do levantamento, e que tem como objetivo final as coordenadas tridimensionais espaciais de um ponto objeto, o qual pode fazer parte de uma estrutura, de uma parte isolada de uma peça etc.

Por se tratar de um método onde se utilizam observações de direções horizontais e verticais, foi efetivado um estudo dos erros observacionais e sistemáticos envolvidos nas mensurações.

Com este objetivo estudaram-se alguns sistemas de coordenadas utilizados em Engenharia, propondo-se no trabalho a utilização de referenciais tridimensionais de referência locais e se possível, perfeitamente integrados aos referenciais geodésicos de alta precisão.

Desenvolveu-se instrumental e metodologia, efetuando-se a parte observacional com determinações de coordenadas de pontos situados em ambientes laboratoriais. Foi ainda, efetuado um ensaio em Laboratório de Engenharia de flexão de uma viga de aço. Também desenvolveram-se experimentos com a determinação da variação térmica de laboratórios.

De posse dos resultados foi possível demonstrar a eficácia do método para trabalhos em ambientes restritos, com futuro promissor no controle de estruturas de aço, madeira, concreto armado, na mensuração de produtos industriais, no posicionamento de máquinas, etc..

ABSTRACT

The Engineering of Precision is an speciality suggested by the International Association of Geodesy (IAG), considering theoretical and applied aspects related to accuracy techniques of measurements; processing of data and associated models used in surveying. The main objectives are the the position, control, location, implantation and measuring related to works and projects in Engineering. This work, was inserted in this context, with the objective of obtaining the three-dimensional cartesian coordinates of topographical points with high precision, through the use of three-dimensional optical intersection method.

The method consists in obtaining the directors cosine of two space directions. These directions are defined by two optical axis of the used total stations or theodolites. Must be known the distance between optical centers with defines the scale of the survey. The final purpose are the coordinates of object points, These points can be part of a structure, isolated part of a piece, etc.

This method use horizontal and vertical directions observations. It was developed a study of systematic errors in the measurements.

They were also studied the coordinate systems applied to Engineering works. They are in special discussed the local three-dimensional coordinate frame and its integration with high precision geodesic reference system.

They were developed instruments and methodology applied to the measuring and determination of point coordinates in laboratory. The observations were developed in Laboratory of Engineering, in order to determine the flexion of steel beam. The thermal variation in the room of research was observed.

The results of the works demonstrate the effecience of the method applied in restricted ambients. The future are promising in applications like: control of structures of wood, steel, armed concrete and in the mensuring of industrial products, in position of machines, qulity control, etc..

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Alguns problemas de Engenharia, peculiares em essência, exigem soluções elaboradas e muitas vezes demandam amplos estudos. Envolvem muitos ramos das ciências exatas, da Terra e desenvolvimento tecnológico.

As locações de máquinas industriais, o controle de qualidade métrico dos produtos, as adaptações às normas internacionais de qualidade e produtividade, exigem aferições das mensurações lineares e angulares, a aplicação de metodologia específica e controle de qualidade das medidas. As medidas diretas de distâncias nem sempre são possíveis nestes trabalhos, tornando-se necessária a aplicação de métodos de interseções onde a mensuração de ângulos ou direções é fundamental. Os levantamentos envolvidos são particulares tanto no que concerne a escala do trabalho, como na metodologia empregada. O processo de redução dos dados e a análise final dos resultados deve ter precisão compatível com as exigências das normas que regulam a qualidade dos produtos.

O fato de se trabalhar em locais confinados e fechados, geralmente com dimensões reduzidas, faz com que os processos de medições utilizáveis tenham soluções próprias e particulares para cada caso, sempre considerando as características ambientais.

Cada vez mais torna-se viável um estudo de alguns destes problemas com a pesquisa das respectivas soluções, além do estudo dos erros cometidos e propagados nas medidas, e um relacionamento com os trabalhos normais da Topografia.

A Topografia numa visão atual, trata dos estudos, levantamentos, planejamentos e projetos de posição e locação de trabalhos de engenharia, considerando uma parte restrita da Terra modelada como um plano, o qual é denominado de plano topográfico, único para uma pequena região onde os erros de projeções possam ser considerados desprezíveis. Numa outra visão, poder-se-ia considerá-la como um caso particular da Geodésia, onde mesmo uma porção reduzida da superfície da Terra pode ser considerada com todo o rigor de tratamento matemático e físico, que esta ciência permite, e onde o rebatimento no plano topográfico torne-se somente uma representação cartográfica. Em níveis de acurácia da ordem do milímetro ou frações deste ou ainda para frações do segundo de arco; esta última visão deve ser questionada e se possível implementada. Tal é o nível de acurácia exigido costumeiramente em uma série de problemas associados com locações especiais, estabelecimento de bases de calibração em ambientes industriais ou mesmo no controle de qualidade de ensaios técnicos ou produção industrial [IAG, 1991].

Em 1991, a IUGG criou a Comissão Especial de “Aplicações da Geodésia à Engenharia” dentro da Seção I – Posicionamento, exatamente visando o estudo destes problemas específicos. Considerando os aspectos teóricos e aplicados relacionados com as grandes exigências de acurácia, técnicas de medições, processamento de dados e modelagem associados com levantamentos desde ambientes especiais até o de grandes estruturas, surgiu a especialidade denominada de “Engenharia de Precisão” [IAG, 1999].

O autor pretende introduzir com este trabalho a discussão e a realização do referencial instrumental em ambientes restritos (tais como os industriais) e sua integração ao referencial geodésico, assim como os efeitos ambientais específicos sobre os levantamentos, tais como aqueles em condições extremas

encontradas nos ambientes industriais. Os levantamentos assim condicionados serão denominados de levantamentos topográficos industriais.

Além dos aspectos teóricos envolvidos, os problemas práticos decorrentes da implantação de pontos topográficos próximos em ambientes confinados, também, o estudo dos erros cometidos nas medições, dos erros instrumentais são levados em conta no desenvolvimento de novas metodologias e técnicas.

Numa perspectiva ainda maior, pode-se estudar a automação dos processos envolvidos, tanto de obtenção das medidas como do resultado final e análise de erros cometidos, desenvolvendo processos industriais competitivos.

Pensando desta forma, propõe-se um trabalho dentro de um projeto de pesquisa cujas principais características serão o de desenvolvimento teórico e prático numa área cujas potencialidades são enormes.

1.2 OBJETIVOS

Objetiva o presente trabalho a obtenção de coordenadas de pontos topográficos com alta precisão, utilizando de desenvolvimento de metodologia específica e através de técnicas de interseção óptica tridimensional, tendo em vista aplicações industriais.

1.2.1 OBJETIVOS GERAIS

De uma forma geral o presente trabalho tem a ambição de propor um novo ponto de vista em relação à disciplina Topografia, mostrando que antigas metodologias evoluem, vestem uma nova roupagem e continuam sendo importantes e fundamentais. No que diz respeito as formulações conceituais

empregadas pretende-se discutir de forma enfática a Topografia como um caso particular da Geodésia, observando principalmente as simplificações e reduções das medidas efetuadas no terreno. Inicialmente foi necessário uma discussão aprofundada sobre os sistemas de coordenadas utilizados em Topografia, onde demonstrou-se preferência por sistemas de coordenadas tridimensionais de pontos topográficos; analisando-se as simplificações envolvidas nos rebatimentos das medidas em planos horizontais e verticais e suas conseqüências. No trabalho dar-se-á maior ênfase em observações de direções, principalmente analisando-se os efeitos dos erros de excentricidade, de centragem, de horizontalismo, de colimação e outros; suas propagações no posicionamento [Patterson,1988],[Xiaoli et al,1996] [Nadal et al, 1999].

O projeto de levantamento topográfico será proposto no trabalho, na forma de uma pré análise de métodos e instrumentos.

Outro objetivo deste trabalho, trata da análise dos efeitos ambientais, principalmente aquele devido às variações térmicas do ambiente nas medidas. Com esse objetivo alguns experimentos serão realizados, utilizando-se de sensores térmicos colocados próximos às estações totais e aos alvos. Também será medido o gradiente vertical e horizontal da temperatura nos ambientes onde forem realizados experimentos.

Durante os trabalhos dar-se-á ênfase nas conceituações modernas da metrologia, principalmente nas características de aferição, acurácia, precisão do instrumental, método e técnica utilizado.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho, são o estudo e a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos topográficos ou o posicionamento em

local de ambiente confinado (não necessariamente fechado), com a utilização de instrumentos e métodos topográficos modernos.

A obtenção de coordenadas de pontos, por vários caminhos, estudo dos erros instrumentais, pessoais e técnicos com a proposição de metodologia específica para a topografia industrial.

Para se chegar ao objetivo específico será ainda necessário um estudo de projeto topográfico de levantamento, que incluirá pré-análise de equipamentos, dos métodos e das técnicas [Chrzanowski, 1977].

1.3 LOCALIZAÇÃO DOS TRABALHOS

Os trabalhos de campo, foram desenvolvidos junto ao Laboratório de Aferição do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) e no Laboratório de Materiais e Estruturas do Setor de Tecnologia da UFPr., (LAME) utilizando a estrutura já existente e implantando novos equipamentos.

1.4 METODOLOGIA APLICADA

1.4.1 TRABALHOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

Nos Laboratórios de Aferição e de Materiais e Estruturas foram desenvolvidas as experiências principais que compõe este trabalho. Por exemplo, um dos experimentos utiliza dois tripés industriais rígidos, os quais foram construídos, baseados em modelos utilizados em outros países para topografia industrial. Estes tripés permitem a instalação de teodolitos ou de estações totais de forma rígida em pontos previamente definidos, além de permitirem a regulagem da altura dos instrumentos; este fato é muito importante

na orientação entre seus centros ópticos. O objetivo deste experimento consiste na medição da distância entre os centros ópticos de dois teodolitos (previamente classificados), colocados nos tripés como foi descritos acima; após a orientação entre os centros ópticos e através de solução específica de triangulação espacial observando-se os extremos de uma estadia horizontal de invar.

Medem-se direções horizontais e verticais, com eliminação e controle de erros através de visadas em dupla posição da luneta a pontos definidos, colocados nas paredes do laboratório, obtendo-se suas coordenadas tridimensionais [Allan, 1988].

Também, realizaram-se experimentos com o mesmo tipo de medições descritas acima, com algumas peças mecânicas tais como: vigas de aço, cujos parâmetros estruturais são previamente conhecidos por outros métodos de mensuração industrial.

Foi desenvolvido pelo autor um projeto de alvo industrial que permite a pontaria precisa a pontos cuja distância máxima é de vinte metros.

A colocação dos pontos de interesse no laboratório, a localização dos tripés de alta precisão, a mensuração de peças, obedecerão a um projeto de levantamento a ser executado, definido a partir de pré-análise de equipamentos, materiais e métodos.

Torna-se fundamental nestes experimentos a aferição e calibração do instrumental utilizado, com técnicas já conhecidas e a pesquisar.

A utilização de equipamentos desenvolvidos pelo laboratório (tripés de alta estabilidade) e outros nos experimentos tornaram a pesquisa com contribuição também nesta área.

Outro objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento térmico de um ambiente e sua consequência nas medições efetuadas. Com esse objetivo,

alguns experimentos foram efetivados com testes em laboratório, mostrando a variação térmica em ambientes com e sem climatização.

1.4.2 TRABALHOS DE ESCRITÓRIO

Os dados coletados em campo serão reduzidos e analisados no escritório, com a confecção de programas de computação específicos de solução aos problemas propostos [Camacho,1988].

Os modelos matemáticos já desenvolvidos permitem o ajustamento dos dados pelo método das variações das coordenadas [Allan, 1988].

Numa segunda etapa serão pesquisadas soluções de automação dos processos envolvidos nos laboratórios.

CAPITULO II - SISTEMAS DE COORDENADAS UTILIZADOS EM ENGENHARIA

2.1 INTRODUÇÃO

Um dos problemas encontrados nos trabalhos de levantamentos referentes a mensuração e implantação de pontos para posicionamento em Engenharia é o da escolha de um sistema de referência adequado para expressar os resultados das medidas realizadas e a sua integração com o referencial mais geral no sentido geodésico.

Ao se melhorar a acurácia das observações, cria-se a necessidade da interpretação de novos erros, principalmente a de erros sistemáticos que se apresentam de forma significativa. Em outras palavras, com a melhoria da qualidade das observações, erros que antes não eram considerados começam a aparecer de forma significativa.

A escolha de um sistema de referência também passa por este processo, sendo que sua necessidade de melhora é progressiva em relação a acurácia. A medida que se desenvolve uma significativa melhora dos instrumentos e métodos, mais se acentua a necessidade de análise de erros sistemáticos que se apresentam e do sistema de referência a ser utilizado, o qual é materializado ou realizado pelo instrumento.

Dentro dos objetivos deste trabalho se insere o interesse em trabalhar-se com medidas angulares de alta precisão, visando a obtenção de coordenadas por métodos consagrados das interseções, levando-se em conta erros sistemáticos precípuos dentre outros, os devidos as influências do uso de sistemas não suficientemente precisos e sua integração com referenciais de natureza geodésica. Os sistemas locais, materializados por exemplo, por uma estação total, são uteis para levantamentos aplicados à Engenharia. No entanto, tais levantamentos devem ser, via de regra integrados a sistemas de referência globais, tais como aqueles

realizados a partir do GPS (“Global Position System”), também ferramenta usual de trabalho do engenheiro. Esta é uma situação bem presente com a qual o engenheiro se defronta, neste caso devem ser consideradas as características intrínsecas de cada sistema de referência, os erros sistemáticos associados com suas realizações, as suas integrações. Se não forem tomados estes cuidados grande parte da potencialidade dos instrumentos em termos de precisão é perdida. Em particular, uma classe importante de problemas de engenharia está associada com o posicionamento é a determinação de parâmetros cinemáticos e dinâmicos de estruturas, onde é fundamental a integração de técnicas de observação, cada qual vinculada a diferentes referenciais tornando mais crítica a análise de integração de referenciais.

Foi Galileu (1564-1642) que pela primeira vez, demonstrou a importância dos sistemas de referência na formulação das leis que regem a descrição dos fenômenos físicos. As leis físicas nada mais são do que relações mensuráveis entre grandezas físicas. Por outro lado, só faz sentido falar-se em medida de uma grandeza física, se for adotado um sistema de referência, relativamente ao qual ela poderá ser utilizada.

Newton (1642-1727) consolidou de forma inquestionável os fundamentos da ciência moderna. Desde que foram enunciados, de forma geral e precisa, os postulados da mecânica clássica, realizou-se a síntese dos movimentos dos astros e a precisão com que se pode demonstrar a configuração planetária durante séculos, legitimou a doutrina que acabou servindo de base e de modelo a todos os ramos das ciências em que se pode introduzir medidas.

A Geodésia moderna busca de forma incessante um modelo que melhor se adapte física e matematicamente a forma e dimensões da Terra. Um modelo que possa ser utilizado por um determinado intervalo de tempo, que torne possível a comparação entre medidas efetivadas em épocas diferentes, poderá permitir uma avaliação da variação da forma e dos movimentos intrínsecos do planeta.

A Topografia que pode ser pensada como uma caso particular da Geodésia,

classificada como uma operação de medidas geodésicas numa região restrita da Terra, também necessita de um modelo matemático e físico não simplista, que atenda às necessidades de representação da superfície terrestre com fins de Engenharia.

Tradicionalmente, tem-se como característica da Topografia, a limitação de parte da superfície da Terra considerada modelada por um plano, o qual é denominado de plano topográfico, neste são reduzidas todas as medidas efetivadas. Neste caso é simplesmente desconsiderada a existência dos erros sistemáticos devidos a curvatura e ao desvio da vertical.

Poder-se-ia denominar de "topografia de precisão", a consideração de um levantamento com características de levantamento geodésico numa região muito restrita da Terra, nele inferindo-se todas as correções que tradicionalmente são efetivadas nos trabalhos regionais e nacionais.

O problema fundamental inerente a escolha de um sistema de referência pode ser sintetizado pela seguinte pergunta: pode um observador voltar a um local e repetir com precisão uma medição anteriormente executada? A resposta seria: na maioria dos casos não. Uma vez que não se resguarda inteiramente “a cena do crime”, isto é, da medição, quando se analisam todos os fatos. O ideal seria um sistema de referência que permanecesse rigorosamente igual com o fluir do tempo (inercial), mas esta condição é bastante complexa. Mesmo um sistema que permanecesse inalterado em relação a própria Terra teria dificuldades em se manter.

Problemas envolvendo movimentos tectônicos de placas, movimentos geodinâmicos em geral, movimentos elásticos, inelásticos de atração gravitacional, magnéticos, movimentos de solo, etc., fariam a impossibilidade de um sistema rigidamente associado à Terra.

Atualmente, a filosofia corrente na Engenharia prevê o uso acentuado de estruturas deslocáveis, isto é, a utilização por parte do engenheiro, de deslocamentos, de leveza nas construções, ao contrário da visão anterior na qual a

rigidez de uma estrutura era o fundamento. Este princípio também se aplica a Geodésia e a Topografia no que concerne a redes e sistemas de referência, onde a tendência atual é a utilização de sistemas "deslocáveis" no tempo ou "quase-inerciais", nos quais os deslocamentos possam ser conhecidos, medidos ou inferidos.

2.2 SISTEMA DE REFERÊNCIA TERRESTRE

Convém salientar que na língua inglesa existem dois vocábulos: "system" o qual pode ser entendido como definição conceitual de um sistema e "frame" o qual pode ser interpretado como a materialização ou realização prática de um sistema. A terminologia proposta para os sistemas terrestre [Kovalevsky, J et.al, 1981] é mostrada a seguir:

- a) SISTEMA IDEAL: o sistema ideal é um sistema conceitualmente definido. Um sistema ideal para a Terra é aquele que não apresenta rotações nem translações. Nele, por exemplo, as deformações da crosta terrestre são medidas. O conceito de ideal para sistema celeste é equivalente ao conceito de sistema inercial, definido como invariável no tempo, válido para as equações diferenciais dos movimentos celestes e que não inclua nenhum termo devido a rotações. Em ambos os casos o termo ideal indica a definição conceitual, onde são propostos meios para obtenção dos sistemas.
- b) SISTEMA CONVENCIONAL: representa uma das escolhas efetivadas para a materialização de um sistema de referência (conjunto de parâmetros adotados para materializar um determinado sistema que não é único e definido).
- c) SISTEMA CONVENCIONAL DE REFERÊNCIA: deve ser definido, como o modelo que será utilizado nas transformações geradas entre a configuração básica do sistema e suas coordenadas (nesse ponto as coordenadas são inteiramente definidas mas não necessariamente acessíveis).
- d) MATERIALIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFERÊNCIA: determina os

meios para efetivar ou realizar um sistema de referência que pode ser usado quantitativamente para descrever a posição e movimentos sobre a Terra ou no espaço (sistemas celestes).

e) MATERIALIZAÇÃO DO SISTEMA CONVENCIONAL DE REFERÊNCIA: é a escolha dos parâmetros fundamentais do sistema, por exemplo semi-eixo maior, achatamento, origem, etc., os quais permitem a sua utilização na prática.

f) SISTEMA CONVENCIONAL "QUASE-INERCIAL" DE REFERÊNCIA (CIS): é um sistema que devido as aproximações introduzidas nos modelos não permitem que a ele se refiram como sistema inercial de referência, pois apresentará variações ao longo do tempo. Um exemplo de sistema quase-inercial de referência é o sistema FK5 (catálogo fundamental número cinco) o qual é materializado pelas coordenadas equatoriais de estrelas fundamentais, mas que tem uma duração estimada de alguns anos devido a erros sistemáticos de observação.

g) SISTEMA CONVENCIONAL TERRESTRE (CTS): é um sistema de referência que tem por objetivo a discussão em termos globais e regionais de problemas geodinâmicos. Por termos globais entende-se o monitoramento de rotação da Terra, enquanto que os regionais dizem respeito aos estudos de movimentos crustais. Para os estudos de rotação interessa a variação da velocidade de rotação e o movimento do eixo de rotação com respeito ao espaço (CIS) e a crosta (CTS).

Um sistema de referencia CTS utilizado deve ser suficientemente acurado de forma a permitir comparações entre determinações do monitoramento da rotação da Terra em épocas distintas [Boucher, 1990].

Um sistema de referência terrestre é atualmente uma implementação de uma análise estatística específica de dados de várias naturezas (VLBI, LLR, giroscópios a laser, gravímetros supercondutores, etc.) de um sistema ideal o qual é quase-cartesiano com uma dada origem, escala e orientação. Na prática é um referencial terrestre, caracterizado por um conjunto de pontos topográficos dos quais são determinadas as coordenadas, que por sua vez são caracterizadas como função do

tempo. Convém aqui, definir a condição de quase-cartesiano de um sistema, a qual aparece na materialização de um sistema pelas coordenadas dos pontos a ele referido, neste caso é sempre provável que os eixos não sejam ortogonais ou não se cruzem na origem, mas em dois pontos distintos, ou os dois fatos acima associados.

A definição de um CTS é efetivada pelas seguintes características: o plano xz contém o meridiano médio de Greenwich; o eixo z contém o CIO e é positivo na direção do polo norte; o eixo y é perpendicular aos eixos x e z formando um sistema dextrógiro. Quando se associa um CTS as constantes geométricas e físicas do campo gravitacional recebe a denominação de Sistema Geodésico de Referência (SGR).

2.3 SISTEMAS GEODÉSICOS DE REFERÊNCIA

Um sistema geodésico de referência normalmente é constituído por parâmetros de um elipsóide de referência associado a um sistema de eixos orientados formando um terno cartesiano de coordenadas tridimensionais com escala conhecida, adaptado a superfície terrestre, de forma a modelá-la. Pode-se afirmar que a precisão final de dados geodésicos está diretamente ligada à precisão da materialização do sistema de referência. Tem como características: a massa do elipsóide é equivalente à massa da Terra; a velocidade angular de rotação do elipsóide é igual à da Terra; a origem do sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais é o centro de massa da Terra e o eixo z coincide com o eixo de rotação da Terra.

Pode-se dividir os sistemas geodésicos de referência em:

- a) sistema de referência geocêntrico: é aquele que tem sua origem no centro de massa da Terra .
- b) sistema de referência quase geocêntrico: sistema definido em caráter regional cuja origem não coincide com o centro de massa da Terra, onde as estruturas

podem ser consideradas estáveis;

c) sistema de referência topocêntrico: é o sistema cuja origem está situada na superfície física da Terra.

Os sistemas geodésicos podem também ser divididos em:

a) sistema geodésico global é aquele que possui as características anteriormente descritas, um exemplo deste sistema é o WGS-84 (“World Geodetic System” - 1984) cujas condições de CTS são: a origem do sistema é o centro de massa da Terra (incluindo oceanos e atmosfera), o eixo z tem a direção do Pólo de Referência IERS (definido pelo BIH para época 1984,0), o eixo x tem como direção o meridiano zero definido pelo BIH com base nas coordenadas adotadas para as suas estações e o eixo y completa o terno dextrógiro. Convém salientar que o eixo x é dirigido para um ponto do equador muitas vezes denominado de “ponto Observatório médio de Greenwich”, definido como uma média para as origens das longitudes obtido pelo BIH.

Baseando-se nas mesmas definições do WGS-84 surgiu o ITRS (“International Terrestrial Reference System”), com exceção do elipsóide utilizado que no caso é o GRS80, e tem por objetivos a definição de um sistema utilizável internacionalmente nos levantamentos GPS, sua materialização foi efetivada por uma rede de pontos distribuídos uniformemente na Terra denominada de ITRF (“International Terrestrial Reference Frame”).

b) sistema geodésico local pode ser definido como sendo aquele no qual o centro do elipsóide é deslocado em relação ao centro de massa da Terra com vistas a um melhor ajuste com a região onde será aplicado. Seu terno cartesiano é dextrógiro e seus eixos paralelos ao eixo que contém o CTP (“conventional terrestrial pole”) e ao plano do MMG (figura 2.1).

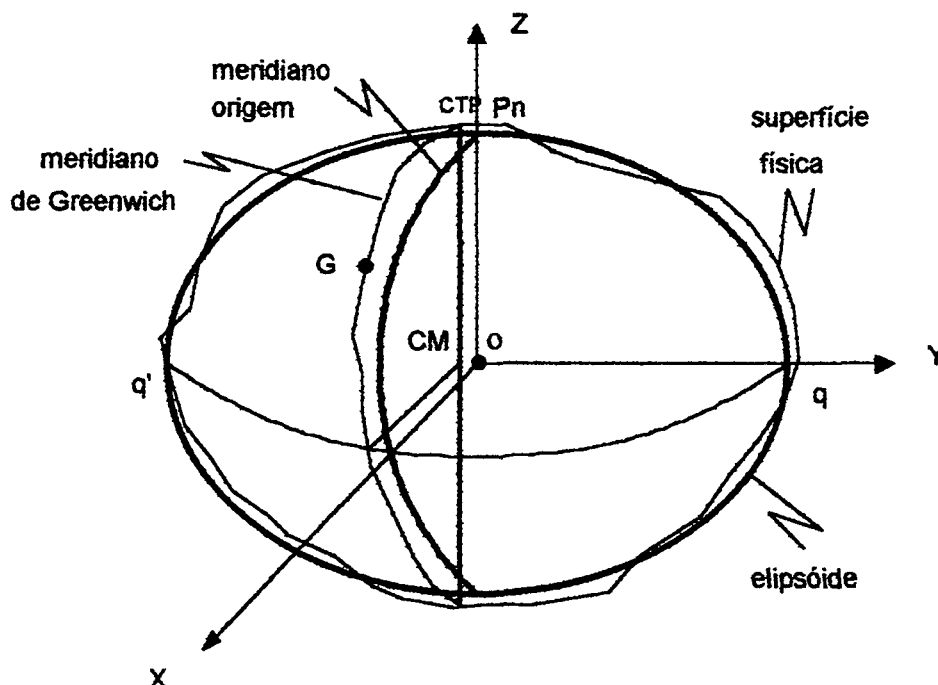


Figura 2.1 - Sistema geodésico local de referência

No Brasil, por força da norma técnica PR-22 de 1 de agosto de 1983 [IBGE, 1983], está em vigor um sistema de referência denominado de SGB - sistema geodésico brasileiro, o qual é definido a partir de um conjunto de pontos geodésicos implantados na porção superior da superfície terrestre limitada pelas fronteiras do País. É caracterizado por uma "imagem geométrica da Terra definida pelo Elipsóide de Referência Internacional de 1967", sendo dividido em características plano-altimétricas.

O referencial altimétrico coincide com a superfície eqüipotencial que contém o nível médio do mar definido pelas observações maregráficas tomadas no porto de Imbituba, litoral do Estado de Santa Catarina, de 1949 a 1957.

O referencial de controle horizontal do SGB, é definido a partir dos parâmetros que também integram o SAD-69 ("South American Datum - 1969") que possui as seguintes características:

a) - para a figura geométrica para a Terra adota-se o elipsóide internacional 1967, cujas características são o semi-eixo maior e o achatamento dados pelas

expressões:

$$a = 6.378.160,000\text{m}$$

$$f = 1/298,25$$

Convém salientar neste ponto, que na verdade o sistema geodésico brasileiro como descrito na norma técnica acima referida apresenta um erro de arredondamento no achatamento do elipsóide internacional 1967, cujo valor real é [Gemael, 1977]:

$$f = 1/298,247167427.$$

Por força de norma técnica deve-se adotar o valor nela prescrito.

b) Orientação: o SGB é um sistema quase-geocêntrico, com eixo de rotação paralelo ao eixo de rotação da Terra, o plano meridiano origem paralelo ao plano meridiano médio de Greenwich com definido pelo *Bureau International L'Heure*. A orientação topocêntrica é dada pelas coordenadas geodésicas do vértice Chuá da cadeia de triangulação brasileira:

$$\phi = 19^{\circ} 45' 41,6527'' \text{ S}$$

$$\lambda = 48^{\circ} 06' 04,0639'' \text{ Oeste de Greenwich}$$

$$\alpha = 271^{\circ} 30' 04,05'' \text{ SWNE para o vértice Uberaba}$$

$$N = 0,0 \text{ m}$$

$$\psi = -0,31''$$

$$\eta = 3,59''$$

a ondulação geoidal no datum é nula por imposição, o que faz com que o geóide coincida com o elipsóide neste ponto, mas como as componentes do desvio da vertical (ψ e η) não são nulas, uma superfície é inclinada em relação à outra.

Em 1993, teve início o Projeto SIRGAS (Sistema de Coordenadas Geocêntricas para América do Sul), adotou-se inicialmente o ITRF93 e o elipsóide GRS-80, implantou-se a seguir uma rede de pontos na América do Sul, sendo as coordenadas obtidas ajustadas. O interessante no sistema SIRGAS é que se trata de uma rede de pontos com coordenadas tridimensionais ao passo que o sistema SAD-

69 trata separadamente as redes altimétricas e planimétricas. No que tange à precisão o SIRGAS é muito mais preciso, devendo tornar-se referencial geodésico para Engenharia nos próximos anos.

2.4 SISTEMA LOCAL DE REFERÊNCIA

O melhor instrumento desenvolvido pelo Engenheiro sem dúvida é o fio de prumo, desde o mais rudimentar composto por um fio teoricamente inextensível no qual fixa-se uma massa, ao mais sofisticado onde por interferometria óptica, utilizando-se um raio *LASER* emitido e posteriormente refletido em um banho de mercúrio, permitem a obtenção de uma direção vertical. A palavra vertical na verdade contempla dois significados distintos: vertical genérica perpendicular às equipotenciais do campo da gravidade e vertical de um ponto a qual simboliza a direção do vetor gravidade no ponto. O fio de prumo materializa a linha vertical. A vertical no sentido genérico é uma linha perpendicular as equipotenciais do campo da gravidade da Terra, determinável ponto a ponto. As linhas verticais convergem todas para o centro de massa da Terra. A vertical de um ponto é utilizada como referência física em todos os equipamentos de medição utilizados em levantamentos geodésicos e topográficos.

Desta forma e de uma maneira geral, adota-se nos trabalhos de Engenharia um sistema local de referência (figura 2.2), o qual consiste num terno de eixos ortogonais cartesianos, com origem arbitrária num ponto topográfico definido e com orientação levógira, com um dos eixos definido pela vertical do ponto considerado com sentido positivo para fora da superfície, e outro coincidente com a tangente ao meridiano instantâneo materializado no ponto e sentido positivo para o ponto cardeal norte. Naturalmente o terceiro eixo estará contido na linha leste-oeste com sentido positivo para leste. Este sistema meramente convencional, muitas vezes é associado a um sistema terrestre para representação cartográfica, e na maioria das vezes sem as devidas correções inerentes a projeção cartográfica.

Na topografia, trabalha-se ainda com este sistema dividido em duas partes uma definida como planimétrica, nas quais as medidas obtidas são trabalhadas relativamente aos eixos contido no plano do horizonte (aqui definido como perpendicular à vertical do ponto de origem do sistema); outra definida como altimétrica, na qual as medidas são referidas ao eixo vertical do sistema.

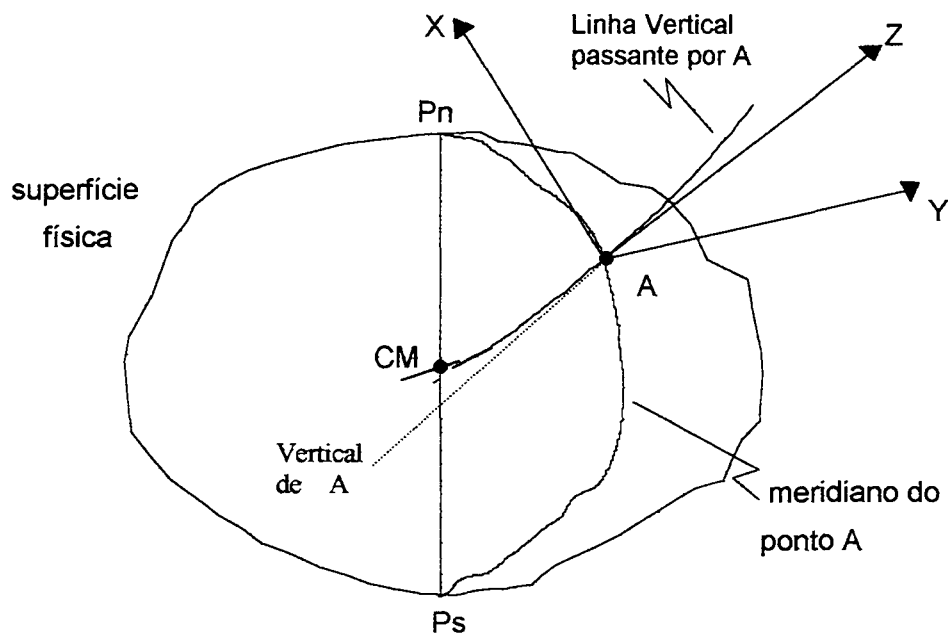


Figura 2.2 - Sistema local de referência

Na topografia tradicionalmente utiliza-se este sistema de forma simplificada, ou seja, escolhe-se um ponto da superfície terrestre como origem dos levantamentos, e aplica-se este sistema. Considera-se uma porção limitada da superfície como plana de forma que o sistema escolhido é único para todo o levantamento, no denominado plano topográfico local.

Nestes sistemas topográficos locais ou com características locais, são resolvidos muitos problemas cotidianos da Topografia, como por exemplo o posicionamento topográfico,⁴ a determinação de limites, cadastros de propriedades, mensuração de áreas, locações de pequenas obras, etc.

A norma técnica NBR 13133 introduz o conceito de projeção topográfica ou

sistema topográfico local para a representação de medições efetivadas na superfície física da Terra. As características principais deste sistema são: *as projetantes são ortogonais à superfície de projeção; a superfície de projeção é um plano normal à vertical do lugar no ponto da superfície terrestre considerado como origem dos levantamentos, sendo o referencial altimétrico referido ao datum vertical brasileiro; as deformações máximas inerentes a desconsideração da curvatura terrestre e da refração atmosférica são fornecidas; o plano de projeção tem dimensões máximas limitadas a 80 km a partir da origem; a localização planimétrica dos pontos é feita por um sistema cartesiano como definido anteriormente. Portanto, são negligenciados os erros sistemáticos não significativos oriundos da transformação entre a superfície e um plano.*

A NBR 14166 Rede de Referência Cadastral Municipal fixa as diretrizes para a obtenção de plantas cadastrais, cujas coordenadas são obtidas pela transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas plano-retangulares em um sistema topográfico local.

Em problemas especiais como locações de grandes obras, controle de movimentos e recalques em construções, trabalhos com estruturas deslocáveis, ou com estruturas sujeitas a vibrações e outras, há a necessidade de um estudo visando estabelecer um sistema passível de repetibilidade e confiabilidade, ou a associação do sistema local a um sistema global.

2.5 SISTEMAS DE COORDENADAS INSTRUMENTAIS

Uma vez escolhido um sistema de referência, não é possível obter de forma direta coordenadas de pontos sobre o mesmo, uma vez que se utilizam instrumentos os quais realizam medições em relação a um sistema interno o qual denominar-se-á de sistema de coordenadas instrumentais.

Seja uma estação total, onde pode-se associar ao centro do instrumento (c) um sistema de eixos cartesianos ortogonais mostrados na figura 2.3. O eixo dos z

coincide com o eixo principal da estação, o eixo dos x contido no plano do horizonte paralelo a direção zero graus do limbo horizontal e o eixo dos y perpendicular ao eixo dos x no sentido dextrógiro ou levógiro conforme o selecionado no sistema de leituras. O plano xy deve conter o eixo de basculamento da luneta, também denominado de eixo secundário (y). A linha de visada materializará um direção medida no terreno. Ter-se-á ainda condições intrínsecas de associação deste sistema à superfície terrestre, quais sejam: o eixo principal da estação deve coincidir com a vertical do lugar, o plano xy do sistema deve ser horizontal e a linha ca deve ser uma reta e coincidir com o eixo óptico da luneta.

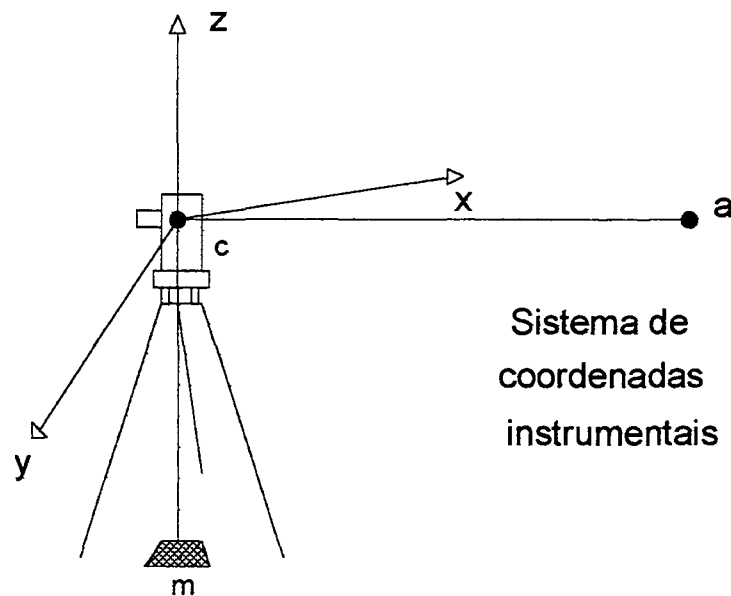


Figura 2.3 - Sistema de coordenadas instrumentais

Sabe-se que são muitas as dificuldades na materialização deste sistema, uma vez que no caso mais geral é quase-cartesiano devido a problemas construtivos e naturais. Em outras palavras o eixo principal não é vertical o eixo secundário não é horizontal, portanto não é perpendicular ao eixo principal e no caso mais geral ambos não são coplanares. O mesmo acontece com o eixo óptico em relação ao eixo secundário. O ponto teórico de origem deste sistema é denominado de ponto cardã.

2.6 TRANSFORMAÇÕES DE COORDENADAS

As coordenadas expressas em um sistema devem ser transformadas em coordenadas expressas num segundo sistema, através de *vinculações e correções*. Estas podem ser processadas em etapas. É de particular interesse a transformação de coordenadas instrumentais em coordenadas geodésicas e vice-versa.

Inicialmente efetua-se uma transformação de coordenadas geodésicas geocêntricas em coordenadas geodésicas topocêntricas.

As fórmulas para transformação de qualquer ponto de coordenadas geodésicas elipsoidais (ϕ, λ, h) em coordenadas cartesianas geocêntricas (X, Y, Z) são facilmente deduzíveis a partir da figura 2.4 a seguir, onde os símbolos tem o seguinte significado:

ϕ : latitude geodésica do ponto A;

λ : longitude geodésica do ponto A;

h : altitude geométrica do ponto A (segmento AA' na figura);

N : raio de curvatura da seção primeiro vertical (segmento A'A'' na figura)

e : excentricidade do elipsóide considerado.

resultando nas expressões:

$$\begin{aligned} X &= (N+h) \cos\phi \cos\lambda \\ Y &= (N+h) \cos\phi \sin\lambda \\ Z &= [N(1 - e^2) + h] \sin\phi \end{aligned} \tag{2.1}$$

Sendo X_o , Y_o e Z_o as coordenadas cartesianas da origem (o) do sistema geodésico cartesiano topocêntrico no sistema geodésico cartesiano geocêntrico, e ϕ_o , λ_o respectivamente, suas latitude geodésica e a longitude geodésica, pode-se escrever as expressões de transformação de um sistema em outro como sendo [Garnés, 1998]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{X}_0$$

e,

$$\mathbf{x} = \mathbf{R}^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)$$

onde:

$$\mathbf{X}^T = [X \ Y \ Z];$$

$$\mathbf{x}^T = [x \ y \ z];$$

e,

$$\mathbf{X}_0^T = [X_0 \ Y_0 \ Z_0];$$

Com o produto de matrizes de rotação, dado por:

$$R = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda_o & -\text{sen}\phi_o \cos\lambda_o & \cos\phi_o \cos\lambda_o \\ \cos\lambda_o & -\text{sen}\phi_o \text{sen}\lambda_o & \cos\phi_o \text{sen}\lambda_o \\ 0 & \cos\phi_o & \text{sen}\phi_o \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

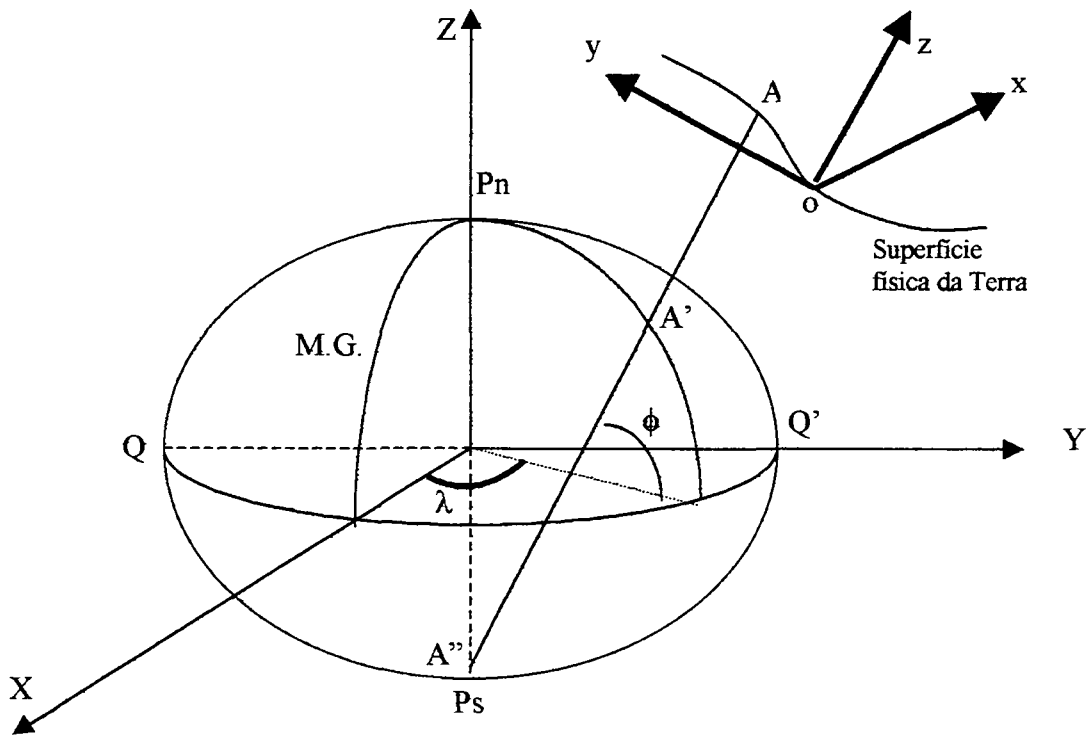


Figura 2.4 - Transformação entre sistemas geodésicos

Quando se medem as coordenadas astronômicas da origem do sistema geodésico cartesiano topocêntrico (Φ = latitude astronômica e Λ = longitude

astronômica), ou quando se determinam as componentes do desvio da vertical (ξ =componente meridiana e η =componente primeiro vertical), tem-se as seguintes relações [Gemael, 1977]:

$$\begin{aligned}\xi &= \Phi - \phi \\ \eta &= (\Lambda - \lambda) \cos \phi\end{aligned}\tag{2.3}$$

Neste caso a transformação de coordenadas topográficas para coordenadas cartesianas geodésicas geocêntricas será dada pela expressão:

$$X = R_A x + X_o$$

e,

$$x = R_A^T (X - X_o)$$

sendo a matriz de rotação ortogonal dada neste caso por:

$$R_A = \begin{bmatrix} -\text{sen}\Lambda_o & -\text{sen}\Phi_o \cos\Lambda_o & \cos\Phi_o \cos\Lambda_o \\ \cos\Lambda_o & -\text{sen}\Phi_o \text{sen}\Lambda_o & \cos\Phi_o \text{sen}\Lambda_o \\ 0 & \cos\Phi_o & \text{sen}\Phi_o \end{bmatrix}$$

portanto, sua transposta é igual a sua inversa, o que facilita sobremaneira as transformações de coordenadas geodésicas em topográficas.

A concatenação do sistema instrumental com o sistema topográfico, poderá ser analisada a partir da concatenação dos eixos, de uma translação relativa a altura do instrumento e principalmente, com a consideração de erros sistemáticos e das observáveis efetivadas.

2.7 OBSERVAÇÕES UTILIZADAS NO TRABALHO E SEUS ERROS

Neste trabalho dar-se-á prioridade a medições angulares, trabalhando-se com o problema da dupla interseção tridimensional, a qual será descrita no capítulo III. As medidas angulares podem ser procedidas de duas formas:

a) medidas de direções, onde trabalha-se diretamente com valores lidos nos limbos horizontais e verticais do teodolito referentes a pontaria do instrumento a um alvo;

b) medidas de ângulos, onde basicamente trabalha-se com a diferença entre valores de duas direções efetivadas a dois alvos distintos, ou em casos particulares ao início da graduação dos limbos.

Do ponto de vista de propagação de variâncias os métodos são diferentes, uma vez que a observação angular nos teodolitos é uma direção, sendo portanto, a propagação de erros em um ângulo tratado como propagação de medidas de duas direções.

No quadro 01 sintetizaram-se os principais erros sistemáticos que ocorrem na medição de uma direção horizontal [Nadal & Moraes, 1999].

Nota-se neste quadro, que a principal forma de se eliminar a maior parte dos erros sistemáticos consiste em se obter o valor da medida de uma direção em observações em dupla posição da luneta.

Alguns autores questionam esta forma de redução [Richardus, 1984], [Harvey & Rüeger, 1992], argumentam que a medida numa posição da luneta já é uma observação, o que aumenta os graus de liberdade no ajustamento. No entanto, não são conclusivos sobre qual é efetivamente o melhor procedimento.

Alguns erros sistemáticos serão tratados com mais ênfase neste capítulo pois são de interesse marcante nas reduções aplicadas no trabalho.

Mesmo após a correção dos erros sistemáticos permanecem nas observações resíduos sistemáticos os quais devem ser separados através de testes e métodos estatísticos específicos [Nadal & Moraes, 1999].

Nas medições de distância zenital, além dos erros enumerados aparecem ainda o erro denominado de zenite instrumental, oriundo da não coincidência da origem do limbo vertical com a vertical do lugar; erro devido a não perpendicularidade do limbo vertical com o eixo secundário e não paralelismo do limbo vertical com a vertical do lugar, quase todos eliminados pela observação em dupla posição da luneta.

QUADRO 2.1 – Erros sistemáticos em observações de direção [Harvey, B. et al,1992]

Descrição do tipo de erro sistemático	Equação para observações em uma posição da luneta	Eliminação em dupla posição da luneta	Definição de termos envolvidos
1- Eixo médio horizontal não perpendicular ao eixo vertical pelo ângulo i_T	$e = i_T \cotg z$	sim	i_T = erro de inclinação do eixo secundário z = distância zenital da pontaria
2 – Linha média de colimação na perpendicular ao eixo horizontal do ângulo i_C	$e = i_C / \sen z$	sim	i_C = erro de colimação
3 – Oscilações no eixo horizontal devido ao não paralelismo da face do cilindro com o eixo de simetria	i_T = série de Fourier obtida função de z i_C = série de Fourier obtida função de z	Algumas vezes	$\lambda_o = 360^\circ$ de z (comprimento da série de Fourier de ordem nula)
4 – linha média de colimação não intercepta o eixo vertical	$e'' = (E/D)206265''$	sim	D = distância ao alvo E = excentricidade
5 – Oscilações no sistema de focalização das lentes	$E = f(D)$ $i_C = f(D)$	sim	Dependência na posição de focalização das lentes
6 – centro do círculo graduado excêntrico (d) em relação ao eixo de rotação	$e = (D/R) \sen \alpha$	sim	R = raio do círculo graduado α = azimuth da direção da excentricidade
7 – erro do círculo graduado - longo período - curto período	e = série de Fourier em β $e = f(\beta)$	Algumas vezes não	β = leitura no círculo
8 – micrômetros ou erros de interpolação de leituras	$e = f(\gamma)$	não	γ = leitura do micrômetro eletrônico
9 – não verticalidade i_o da posição média do eixo vertical	$e = i_o \sen \delta \cotg z$	não	δ = azimuth da direção do máximo i_o (correção em tempo real com o uso de duplos compensadores nos teodolitos eletrônicos)
10 – Oscilação no eixo vertical devido ao não paralelismo da face em relação a uma posição média	i_o = série de Fourier de ε	não	ε = orientação da rotação em relação a uma parte fixa do teodolito.
11 – Oscilação do tripé em um instante t_i	$e = b(t_i - t_o)$	sim	b = coeficiente de variação linear da oscilação
12 – Constante aditiva dos duplos compensadores	$e = a \sen \delta \cotg z$	sim	a = parte residual desconhecida da constante aditiva
13 – Equação pessoal do observador	e = série de fourier de z	não	Depende da repetibilidade, acuidade visual, aproximação da objetiva e da paralaxe visual, dimensões dos alvos
14 – Emissão de calor pelo observador	Não modelado	não	Turbulências na frente da objetiva com reverberação da imagem
15 – refração atmosférica - componente zenital - componente lateral	$R = f(t,P)$ $R_l \cong 8'' P s / t^2 (dt/dx)$	não	t = temperatura P = Pressão atmosférica dt/dx = gradiente horizontal de temperatura s = distância

Serão analisados neste trabalho algumas fontes de erros sistemáticos e suas respectivas correções.

I - REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA: é devida a presença da atmosfera, e seu efeito aparece como um deslocamento aparente da imagem de um objeto, devido as diferentes densidades das camadas percorrida pela luz. A magnitude deste deslocamento é uma função da distância zenital observada (refração atmosférica) e do gradiente térmico lateral (refração lateral), respectivamente são associadas a deslocamentos no sentido vertical e horizontal da imagem observada.

A refração atmosférica (R) é bem estabelecida, através de um modelo de atmosfera baseado em camadas concêntricas, cujo resultado pode ser representado pela fórmula de Laplace [Chauvenet, 1876]:

$$R = \alpha_o (1 - \beta_o) \text{tg } z_o - 0,5 \alpha_o (\beta_o - \alpha_o) \text{tg}^3 z_o \quad (2.4)$$

onde os valores de α_o e β_o são calculados segundo as expressões:

$$[\alpha_o]_{T,P} = [\alpha_o]_{0,760} \frac{P}{760} \cdot \frac{273}{273 + T} \quad (2.5)$$

$$\text{e,} \quad [\beta_o]_{T,P} = [\beta_o]_o \frac{273 + T}{273} \quad (2.6)$$

onde z_o é a distância zenital observada, T é a temperatura em graus centígrados e P é a pressão atmosférica em milímetros de mercúrio.

Nas condições normais de temperatura e pressão CNTP (T= 0° C e P= 760 mm Hg), e para um comprimento de onda da luz igual a $\lambda = 5750 \text{ \AA}$, o índice de refração do ar tem por valor:

$$[n]_{0,760} = 1,00029255$$

que resulta nos coeficientes:

$$[\alpha_o]_{0,760} = 0,00029255 \text{ rd}$$

e,

$$[\beta_o]_o = 0,001254 \text{ rd}$$

Nas expressões acima, os valores da temperatura e pressão são considerados como tomados em uma atmosfera "seca". Para que α_o e β_o sejam representativos é necessário que a pressão lida no barômetro, que é exercida por uma atmosfera de composição mista, a qual inclui a contribuição devida ao vapor d'água (bastante significativa) seja corrigida deste fator. Torna-se necessário a medida de temperatura com psicrômetros cujos termômetros possuem bulbos seco e úmido, permitindo o cálculo da temperatura de saturação do ar, e a conseqüente temperatura do vapor d'água da atmosfera. A pressão medida pode então ser reduzida a uma pressão representativa de uma atmosfera sem aquela contribuição.

Na modulação da pressão atmosférica, o maior problema que aparece é o oriundo das anomalias locais de atmosfera, devido a poeira, fumaça, vento, proximidade do observador da objetiva, gradiente térmico devido a irradiação do corpo humano, e outros que dificilmente podem ser modelados. O limite de precisão em observações ópticas na astrometria é estimado em 0,15", devido a estas anomalias.

A refração lateral é particularmente significativa quando o instrumento ou a linha de visada estão próximas a fontes de irradiação de calor. Um exemplo deste fato ocorre em cidades onde as linhas de visadas estão próximas a paredes expostas ao Sol. O erro neste caso na medida de ângulos pode chegar a segundos de arco [Chrzanowski, 1977].

A refração lateral pode ser explicada pelas diferenças horizontais da temperatura do ar, que fazem o raio visual tender a se aproximar da fonte de calor. Este efeito é na verdade a maior fonte de erros nas medidas de direções horizontais com instrumentos topográficos. Assumindo-se um gradiente horizontal (dT/dx) uniforme o qual persiste ao longo de toda a visada de comprimento S , o ângulo γ

da refração lateral poderá ser calculado pela expressão:

$$\gamma'' = 8,0'' \frac{P S}{T^2} \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

onde, P é a pressão barométrica em mbar, T é a temperatura em ° K e dT/dx é medido ortogonalmente a linha de visada.

$$T = 273,15 + t \text{ } ^\circ \text{ C} \quad (2.8)$$

Um gradiente de 0,001 ° C/m que persiste numa visada de 10km, causará uma refração lateral de 0,9".

A refração atmosférica também influencia a velocidade de propagação da onda eletromagnética, sendo portanto, uma correção necessária às medidas eletrônicas de distância.

II) DESVIO DA VERTICAL: muitas vezes o desvio da vertical é também denominado de deflexão da vertical e corresponde, por definição, ao ângulo formado entre a normal e a vertical num mesmo ponto topográfico. A normal é uma linha definida matematicamente no modelo elipsóide de revolução, enquanto que a vertical é definida fisicamente como perpendicular às equipotenciais do campo da gravidade [Gemael, 1977]. O engenheiro trabalha com seus instrumentos segundo a vertical e reduz suas medições a superfícies matematicamente definidas. Em que pese a pequena dimensão deste ângulo, suas conseqüências quando consideradas em relação aos atuais níveis de acurácia obtidos nas medições topográficas são muito significativas.

Muitos trabalhos clássicos tratam do assunto [Bonford,1983] de forma profunda, deduzindo expressões de transformação de sistemas astronômico de posicionamento (sistemas locais de referência) em sistemas geodésicos através da equação de LaPlace, utilizado nos denominados pontos de LaPlace das triangulações geodésicas.

Hoje se faz mister, além das transformações de azimutes, as transformações

de todas as coordenadas de um sistema em outro.

Para ilustrar-se o erro do desvio da vertical, suponha-se que este tenha em uma região, o valor variando de 5" numa distância de 1km, isto significaria que a sua desconsideração numa visada deste comprimento representaria um erro de 24 μ m.

III) CURVATURA TERRESTRE: trata-se de uma fonte de erro enfatizada nas medidas de altitude e de distâncias, porém, poucos autores a citam nas medidas gerais de ângulos. Na verdade não se tem vetores, com origem nos centros ópticos dos instrumentos tridimensionais, mas linhas curvas que acompanham a curvatura do Terra.

A análise de uma direção no terreno obtida por uma visada com equipamento óptico, realizada pelo eixo óptico da luneta de um teodolito, não é na realidade uma linha reta, mas uma curva que em primeira aproximação poderia ser considerada um arco de circunferência máxima, numa segunda um arco de geodésica no elipsóide, porém na Terra real seria de difícil descrição.

Também um ângulo plano medido no limbo horizontal do teodolito mede o ângulo verdadeiro formado por duas direções num plano tangente as duas visadas, portanto, passível de uma redução devido a curvatura terrestre.

Na figura 2.5 pode-se notar que o ângulo α medido e o reduzido α' são diferentes. As correções para direções horizontais são fornecidas por exemplo em [Ding, X et al. 1996]:

$$\cotg \alpha' = \frac{\cotg \alpha \cos A \cotg z' \sen A}{\sen \alpha}$$

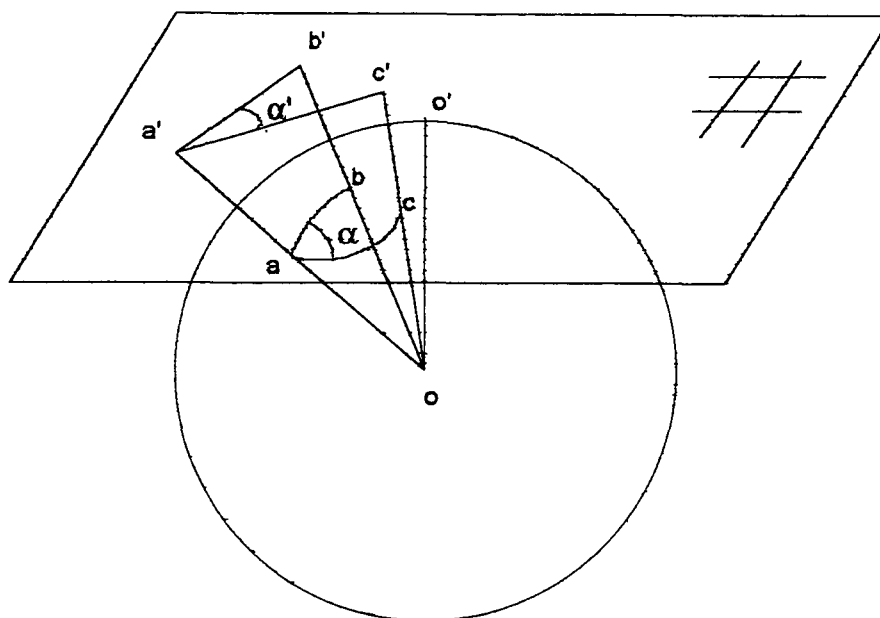


Figura 2.5 Erro de Curvatura. Fonte: [Ding, X et al. 1996]

Onde A é o ângulo central subtendido pelos raios oo' e aa' e z' é o ângulo zenital medido de a para b . Demonstra-se que para $z' = 85^\circ$, uma distância ab igual a 100 m resulta em uma diferença $\alpha - \alpha' = 0,3''$.

IV) CORREÇÕES INSTRUMENTAIS

Como os instrumentos, fisicamente, não possuem rendimento de 100%, pois contém erros de fabricação, para se obter as coordenadas instrumentais são necessárias algumas correções aqui enumeradas, que serão pormenorizadas em capítulo específico deste trabalho.

Assim o eixo principal da estação rigorosamente não materializa a vertical do lugar, mas apresenta em relação a esta, pequenos desvios; este erro pode ser verificado na horizontalidade do limbo horizontal onde estarão associados os eixos x e y ; este plano é inclinado em relação ao horizonte e o ângulo formado é denominado de erro de inclinação do limbo horizontal. Teoricamente o eixo

principal deveria passar pelo centro geométrico do limbo horizontal. Este fato também não ocorre, gerando um erro denominado de excentricidade do limbo horizontal. A graduação do limbo horizontal, oriunda de sua divisão em 360 partes iguais no caso da divisão em graus sexagesimais, apresenta problemas no que diz respeito à separação entre os traços gravados (sua não equidistância perfeita), e na variação diferencial do limbo devido a efeito de desgastes e diferença de temperatura em suas diversas partes. Os denominados teodolitos eletrônicos, nos quais as medidas angulares são efetivadas por métodos elétricos-eletrônicos baseados principalmente na transformação analógica-digital, ou em variações de campos elétricos e ou magnéticos, segundo seus fabricantes não apresentam erros devidos a gravação do limbo [Leica, 1998].

O eixo secundário onde a luneta efetua o movimento de basculamento, deveria ser perpendicular ao eixo principal e horizontal, as duas condições não são totalmente preenchidas, o que faz com que apareça um erro denominado de inclinação do eixo secundário.

O eixo óptico da luneta, por sua vez, deveria ser perpendicular ao eixo secundário, e materializado pelos fios de retículo colocados entre a objetiva e a ocular, este fato também não é perfeitamente efetivado.

Outros erros instrumentais também aparecem como o fato dos eixos serem materializados por superfícies cilíndricas que apresentam abaulamentos e reentrâncias; as lentes apresentam difrações e aberrações não homogêneas, os rolamentos não são perfeitamente esféricos, etc.

No caso de medidas de distâncias, outros erros poderiam ser enumerados tais como: a não coincidência do centro do teodolito com o centro do medidor eletrônico de distância denominado de erro de zero; os defeitos de fase do emissor eletromagnético; erros devidos ao não paralelismo da linha de emissão eixo óptico; etc.

Estes erros instrumentais podem ser tratados isoladamente como erros sistemáticos, quando passíveis de serem determinados. Podem ser eliminados nos

processos de medição, através de compensadores ou pela medição em dupla posição da luneta.

Os erros acidentais restantes podem ser tratados estatisticamente, aumentando-se o número de observações e impondo-se condições geométricas de fechamento nas medidas.

Pode-se inferir a partir do acima exposto que a utilização de sistemas de coordenadas em Engenharia, merece uma reflexão, principalmente no desenvolvimento dos modelos matemáticos necessários aos ajustamentos de dados observados. Tal fato é corroborado pelas exigências atuais de precisão de medidas nestes referenciais, e a necessidade de vinculações com referenciais geodésicos.

CAPÍTULO III – ENGENHARIA DE PRECISÃO

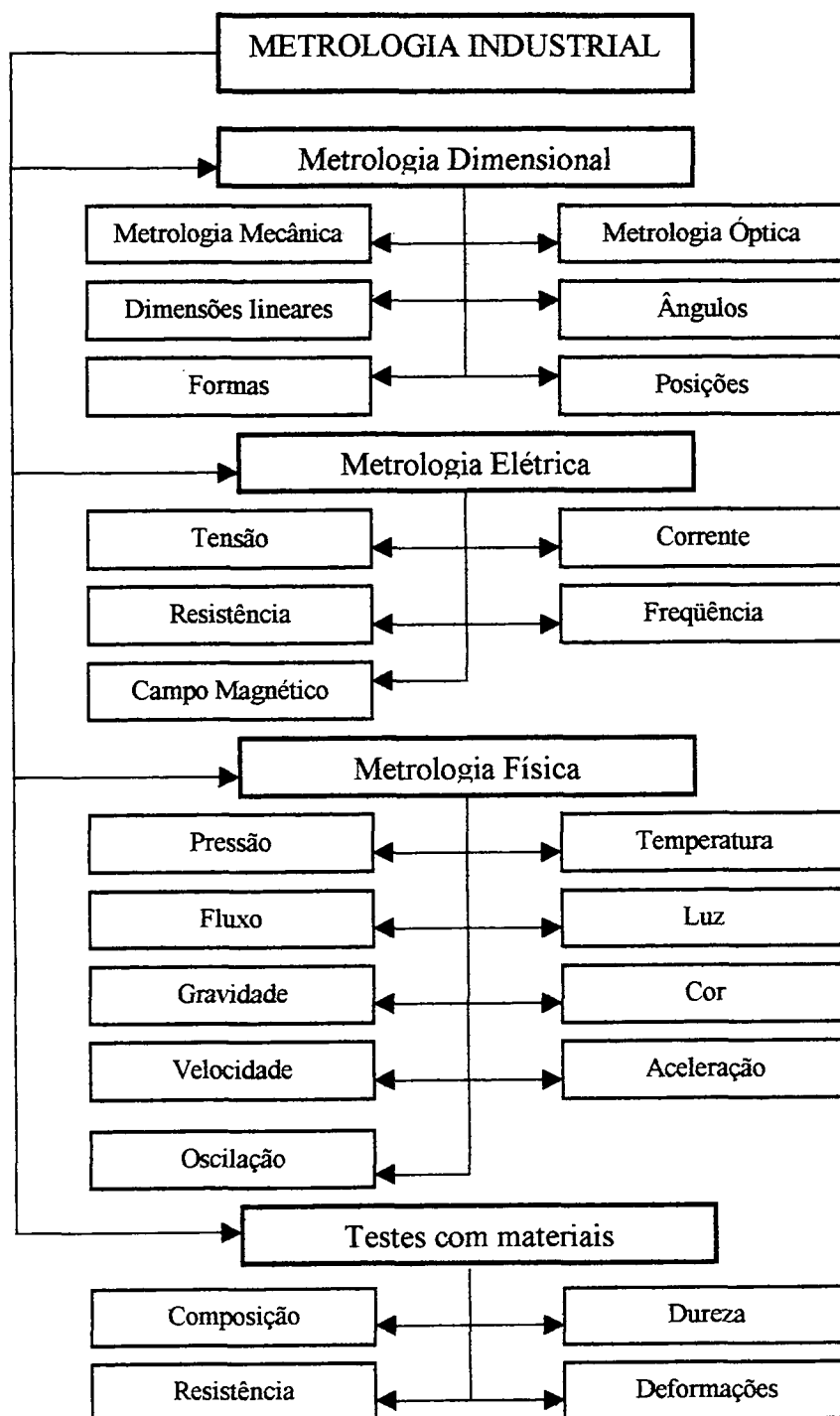
3.1 O POSICIONAMENTO INDUSTRIAL

Denomina-se Metrologia Industrial ao conjunto de técnicas da área de metrologia, aplicado às medições de características físicas e dimensionais dos materiais e produtos. Pode-se visualizar no quadro 3.1, uma divisão didática da área de metrologia.

Divide-se basicamente, a metrologia industrial em: dimensional, elétrica, física, e de materiais. Na metrologia dimensional aplicam-se, analisam-se e tratam-se medidas de distâncias, ângulos, formas (áreas, volumes e superfícies) e posicionamento tridimensional. Este conjunto de operações que compõe a metrologia dimensional utiliza ainda, de aplicações métricas da mecânica e da óptica. A metrologia elétrica é efetivada a partir de medidas de corrente elétrica, de tensão, de resistência, de frequência e de campo magnético. A metrologia física por sua vez, utiliza as medições de pressão, temperatura, fluxos, luz, gravidade, cor, velocidade, aceleração e oscilação. Já os testes de materiais são basicamente de dureza, resistência e composição química. É evidente que esta divisão não torna independente as ações e muitas vezes medições de uma área da metrologia são interdependentes com os resultados e medições de outras áreas. Um exemplo típico deste fato acontece durante as medições de distâncias, as quais dependem fundamentalmente de medições de temperatura e pressão do ambiente no instante das observações, assim como em muitos casos do comprimento de onda e da fase de uma OEM.

A Topografia como parte da Geodésia tem por objetivos [Müller, 1945]:

Quadro 3.1 Metrologia Industrial. Fonte: [Silva, 1999].



- a) a execução de todas as medições que conduzem à determinação da posição relativa de pontos terrestres;
- b) a execução dos cálculos que resultam das referidas medições;
- c) o aproveitamento das medições e dos resultados dos cálculos para confecção de plantas, mapas e representações que atendam às diversas necessidades humanas tais como: políticas, econômicas, técnicas, militares, científicas e culturais.

Na Topografia utilizam-se métodos, técnicas e instrumentos com características próprias em cada aplicação. Essas particularidades aparecem quando se aplicam métodos topográficos em levantamentos com características específicas e que diferem na precisão e na acurácia nos resultados exigidos pelos trabalhos.

Assim pode-se denominar de Topografia Industrial, à parte da Topografia aplicada a trabalhos com finalidade produtiva industrial, controle de qualidade de produtos, controle de estabilidade de máquinas, equipamentos e instalações industriais, posicionamento, locações de alta precisão, determinação de deslocamentos, etc. Tais afirmações, conduzem a refletir a Topografia Industrial como fazendo parte da Topografia empregada na Metrologia Industrial, principalmente na Metrologia Dimensional.

Uma característica da utilização dos métodos e técnicas da Topografia Industrial, é que geralmente esta é efetivada em locais restritos, confinados, sujeitos a vibrações, com emissão de calor, com deslocamentos aleatórios, etc. Trata-se portanto, de um ramo específico da Topografia, onde utilizam-se os mesmos procedimentos dos trabalhos regulares, porém com certas particularidades e características que lhes são intrínsecas.

Pode-se também pensar na Metrologia Dimensional efetivada através de técnicas da Topografia Industrial, aplicáveis na implantação e execução das obras de engenharia, na construção civil, na indústria mecânica, etc. Exemplos destas aplicações acontecem na construção de túneis, na auscultação de barragens, no monitoramento de deslocamentos do terreno e de taludes, na construção de navios, de aeronaves, na montagem de máquinas industriais, na linha de produção, no controle de qualidade métrico de produtos, na robótica, etc..

3.2 SISTEMAS DE MEDIÇÕES INDUSTRIAIS

Com objetivo de se alcançar os níveis de precisão exigidos nas aplicações de Topografia Industrial utilizam-se sistemas de medição que são constituídos por equipamentos específicos, métodos e técnicas refinados cujos objetivos finais são as coordenadas tridimensionais de pontos com distribuição espacial. Convém aqui salientar que, nos trabalhos convencionais de topografia, geralmente entende-se por posição de um ponto topográfico aquela em planta não integrada à cota, nas aplicações de Topografia Industrial o referencial é tridimensional, a posição integrada e o sistema materializado diretamente pelo instrumento.

Os sistemas industriais disponíveis no mercado baseiam-se em sistemas de medições cujas características fundamentais são: precisão ou acurácia, alcance e rapidez (gráfico 3.1). Entende-se por precisão a característica de repetibilidade de uma observação, por acurácia a aproximação da medida ao valor verdadeiro de uma grandeza. Alcance pode ser entendido como a limitação espacial máxima que o sistema abrange quando analisada a qualidade

de uma medida. Rapidez é a capacidade de fornecimento dos valores finais confiáveis e controlados de uma medida. Assim, muitos trabalhos como monitoramento de deslocamentos de estruturas exigem alcance e precisão, mas na maioria das vezes não exigem rapidez pois são lentos e graduais, já o controle de qualidade de produtos industriais exige acurácia, rapidez e alcance num estado que poderia ser qualificado como otimização da metodologia metrológica.

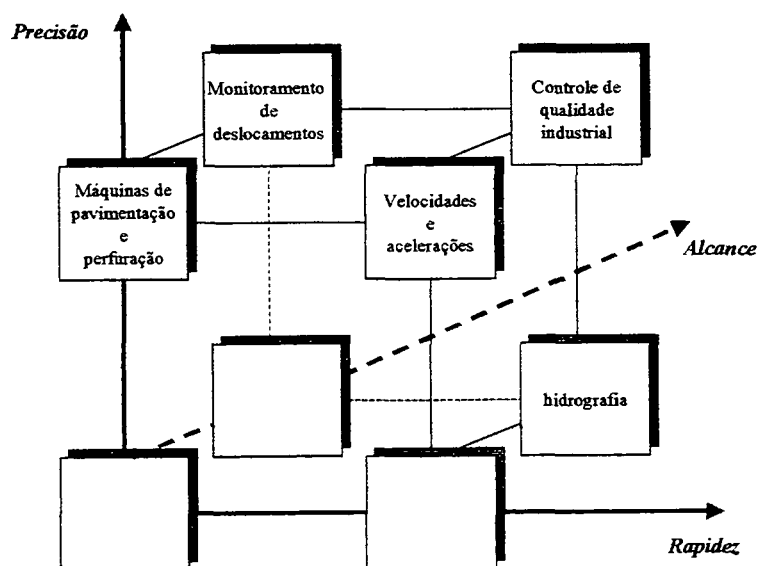


Gráfico 3.1 Principais relações inerentes ao monitoramento e campos de Aplicação. Fonte: [Machado, 1996]

Os sistemas disponíveis no mercado são compostos basicamente por sensores de medição e programas aplicativos. Como sensores de medição podem ser utilizados teodolitos, estações totais, câmaras digitais, sistemas de

varredura a laser (“laser tracker”), etc. Como programas aplicativos existe uma variedade de *softwares* que recebem os dados observacionais obtidos dos sensores de medição, e os processam e analisam elaborando relatórios, desenhos digitais ou outras saídas com imageamento. Estes programas baseiam-se principalmente em triangulações espaciais (quando da utilização de teodolitos), localização polar (utilização de estações totais e *laser tracker*) ou na localização tridimensional quando da utilização de câmaras digitais.

Os objetivos finais das medidas por estes métodos de uma forma geral, podem ser resumidos como:

- a) controle de recalques, recalques diferenciais, deslocamentos nas estruturas naturais e artificiais denominados genericamente como ***deslocamentos***;
- b) validação de modelos de cálculo e dimensionamento previamente definidos, sejam eles derivados de pressupostos matemáticos ou empíricos, denominados como ***validações de modelos***;
- c) acompanhamento do comportamento de construções existentes, no que se refere à detecção de deslocamentos esperados, ocorridos na zona de influência do local instrumentado e observado designada por acompanhamento ou ***monitoramento***;
- d) auxiliar no controle de progressão das frentes de trabalho e avanço de equipamentos, controle de qualidade de produtos designados como ***auxiliar de produção***.

Como já foi aventado, os métodos topográficos baseiam-se na determinação de coordenadas tridimensionais de pontos observados (X,Y,Z), variando a técnica da determinação destas coordenadas (o próprio nivelamento geométrico se enquadra neste princípio geral). Uma vez obtidas estas

coordenadas, podem ser utilizados os mais variados métodos, critérios e meios auxiliares de análise para atingir os objetivos gerais quais sejam:

- a) comparação direta de coordenadas obtidas em épocas diferentes;
- b) comparação vetorial de deslocamentos, levando em conta o módulo, direção e sentido dos mesmos;
- c) comparação de distâncias relativas entre pontos.

Deve-se salientar ainda que os métodos devem fornecer precisão compatível com as necessidades industriais geralmente sub-milimétricas, isto é, com resultados menores que o milímetro. Durante a execução de uma obra ou de controle de fabricação são exigidos resultados de observação e análise destes com rapidez em função de decisões importantes relativas à correção de procedimentos de execução, necessidade de procedimentos de segurança, etc. Isto faz com que alguns procedimentos sejam seguidos, quais sejam: a instalação dos sistemas de medição deve ser rápida; a observação também deve ser efetivada com rapidez para não interferir com a produção, e a acurácia final dos métodos deve ser suficiente para responder as necessidades industriais.

Existem no mercado muitos sistemas entre os quais podem ser citados os seguintes: MONMOS (“Mono Mobile 3D Station”), o sistema APS (“Automatic Polar Sistem”, SMS (“Slope Monitorin System”), ATS (“Auto Tracking System”), ECDS3, etc. Este sistemas que alternam qualidade, alcance e rapidez, foram desenvolvidos por empresas como a Leika, Sokia, etc. Não serão detalhados estes sistemas, aos interessados sugere-se [Horne, 1990], [Machado, 1996].

3.3 SISTEMA TRIDIMENSIONAL DE POSICIONAMENTO INDUSTRIAL DA UFPR. (STPI)

No início dos anos 1980 o Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, firmou convênio de Cooperação Internacional com Universidades da Alemanha, resultando deste, o desenvolvimento do Laboratório de Aferições de Instrumentos. Dentro deste Laboratório o então Professor Álvaro Doubek, na época seu diretor, iniciou as primeiras articulações para montar um sistema de posicionamento tridimensional para uso industrial.

Ao longo da década de 90, alguns instrumentos foram adquiridos, acessórios construídos e métodos e técnicas desenvolvidos principalmente para otimização de levantamentos geodésicos. As pesquisas relacionadas com o posicionamento em 3D em ambientes restritos culminaram em 1997 num projeto de Pesquisa do autor denominado de Topografia Industrial.

Basicamente o STPI é constituído por dois tripés industriais, duas estações totais, uma mira horizontal, um alvo padrão para determinação de qualidade dos trabalhos.

Na seqüência da pesquisa, posterior a este trabalho estão previstos desenvolvimento de outros acessórios necessários a determinação de resíduos de erros instrumentais tais como: banho de mercúrio nadiral, oculares de Galileu, etc.

3.4 PILARES E TRIPÉS UTILIZADOS NO STPI

Um ponto topográfico pode ser definido como um ponto qualquer da Terra, ou de objetos a ela solidários, que possa ou não ser materializado ou ocupado por instrumentos de mensuração topográfica. Entende-se por materialização de um ponto topográfico o ato de se construir fisicamente numa região limitada ou de dimensões negligenciáveis, uma área muito pequena no espaço que possa ser assimilada ao conceito de ponto matemático. Tradicionalmente esta materialização é efetivada na face superior de um pilar de forma prismática confeccionado em concreto armado, onde é colocada uma chapa metálica gravada ou perfurada com um ponto, um cruzamento de traços finos, ou ainda, de um sistema de centragem forçada.

O sistema de centragem forçada (figura 3.3.2) consiste basicamente de um parafuso no qual é colocado rigidamente um instrumento de medida. É muito importante nos trabalhos de monitoramento ou aqueles nos quais os pontos topográficos são reocupados que o sistema de centragem forçada garanta a repetibilidade de operações. Assim para um mesmo instrumento deve ser garantido que o passo da rosca do parafuso e seu comprimento útil (distância utilizada no parafuso para fixar o instrumento) permaneçam constantes ao longo do tempo. Os materiais nos quais o parafuso é confeccionado (na UFPR utiliza-se latão e alumínio) devem ser homogêneos e de boa qualidade, e a fixação deste parafuso no pilar deve ser efetivada de forma a garantir que este não se solte ao longo do tempo. Também deve ser garantido em muitos trabalhos a fixação do sistema de centragem rigidamente à Terra, através da construção de fundações específicas para os pilares. Algumas

vezes o sistema fixo é substituído por um sistema transportável em forma de tripés.

Os pontos topográficos são didaticamente classificados como: estações e alvos.

As estações são pontos topográficos ocupados com teodolitos, estações totais ou distanciômetros e deverão possuir como características principais, a possibilidade de reocupação em épocas diversas, guardando a posição anterior ou com possibilidade de determinação da posição na nova época associada a um referencial único.

Os alvos são pontos topográficos ocupados por instrumentos que permitem a pontaria do eixos ópticos dos instrumentos colocados nas estações tais como balizas, alvos topográficos, etc.

Um exemplo de ponto topográfico é o projeto de um pilar utilizado como estação, indicado nas figuras 3.1 e 3.3. Este foi desenvolvido para calibração de teodolitos pelo Laboratório de Aferição da UFPr. Este pilar é confeccionado em concreto armado, rigidamente associado ao solo através de estacas e sapatas, sendo que o observador ao se deslocar ao seu redor não transmite vibrações diretamente às sapatas, pois o piso para deslocamento não se encontra diretamente associado ao pilar. O sistema de centragem forçada permite a recolocação de um instrumento mecanicamente de forma análoga a uma centragem anterior. O parafuso do sistema de centragem pode ser substituído por outro em função da rosca de fixação do instrumento, com regulagem na altura da rosca. Estima-se que este sistema permite a repetibilidade de colocação de um instrumento na ordem do décimo de milímetro.

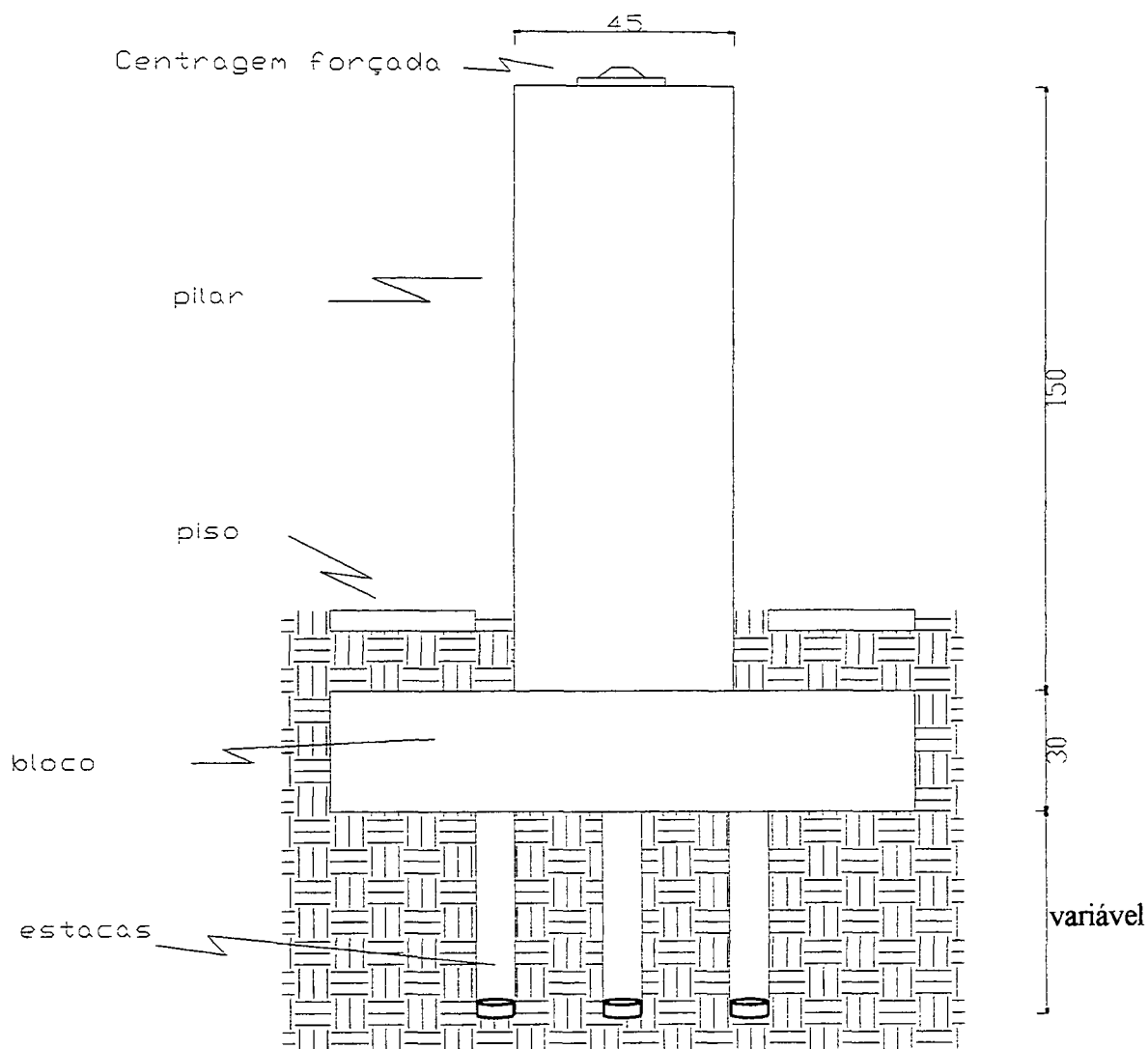


Figura 3.1 Esquema estrutural de um pilar da base de aferição da UFPr (dimensões em centímetros).

Na figura 3.2 mostra-se esquematicamente em corte um dos tripés desenvolvidos para o STPI, que apresentam como vantagem alta rigidez, e a possibilidade de serem utilizados em locais que não permitam a construção de pilares específicos.

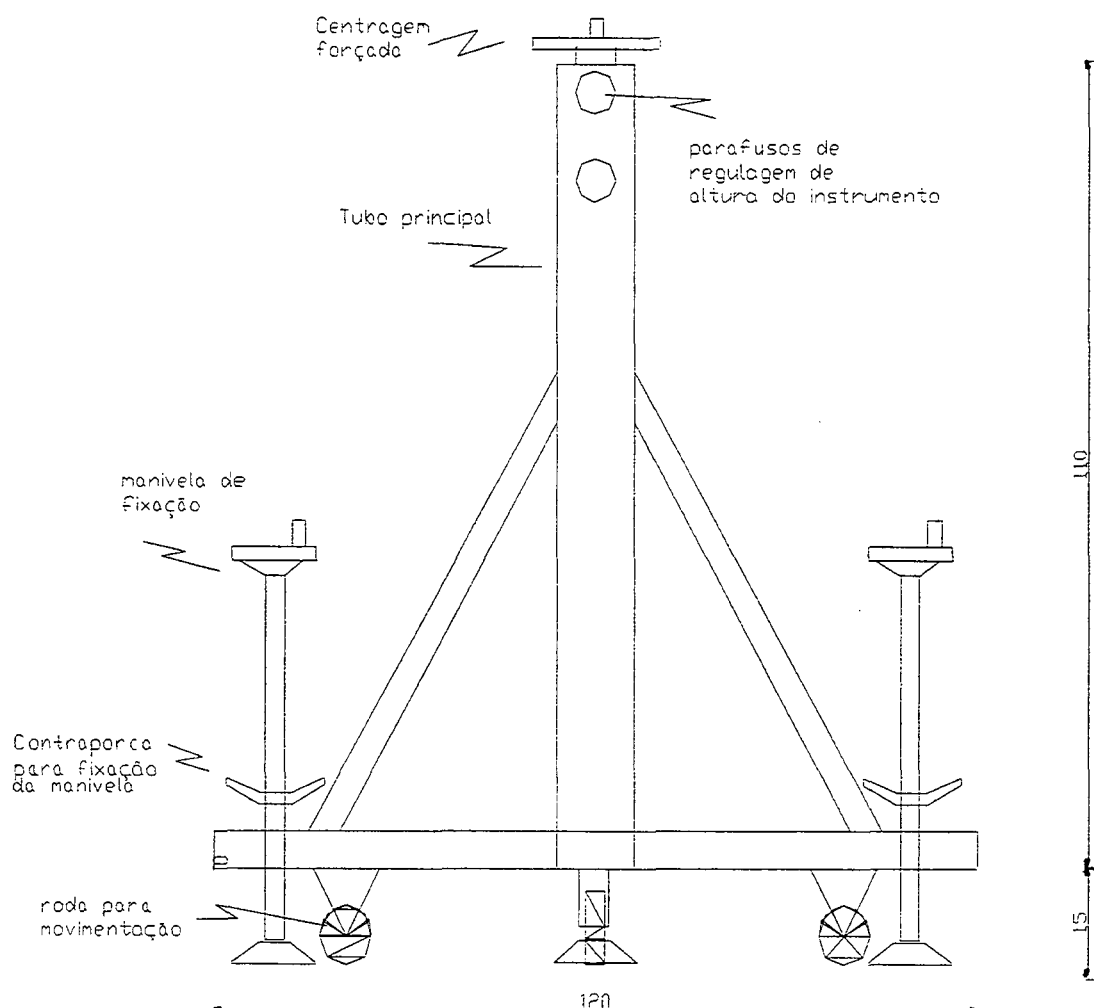


Figura 3.2 Esquema do tripé utilizado em topografia industrial
(dimensões em centímetros).

Este tripés (figura 3.4) foram construídos com estrutura tubular de aço com dimensões fixas: altura 1,25m, lado da base triangular 1,20m. Possuem como características principais o fato de poderem ser facilmente transportados, devido ao fato de possuírem pequenas rodas na parte inferior e serem facilmente nivelados através da utilização de três manivelas de calagem. A parte inferior das manivelas que tem o formato de tronco de cone permite a fixação do tripé no solo. Na parte superior possuem um sistema de centragem

forçada similar ao utilizado nos pilares. Próximos àquele sistema estão colocados parafusos de regulação que permitem a variação de altura da centragem, e podem ser utilizados, por exemplo, no nivelamento entre dois instrumentos, ou seja na colocação dos sistemas ópticos dos instrumentos aproximadamente no mesmo plano. Na realidade a altura dos instrumentos pode ser variada tanto com o uso de manivelas (aproximadamente 0,20m), como através de movimentação da parte superior do tripé (em torno de 0,20m).

Os tripés permitem a variação da posição dos instrumentos de medida com conseqüente definição de redes com os mais variados formatos, de forma a atender quaisquer tipo de levantamento. O tubo principal é oco e tem diâmetro externo de 0,11m e interno de 0,09m fato que permite a passagem do raio óptico definidor do prumo óptico, tornando possível a colocação de um instrumento de medida associado a pontos topográficos localizados no piso das indústrias, que podem ser materializados por chapas metálicas, parafusos, etc.

3.5 ALVOS TOPOGRÁFICOS DESENVOLVIDOS PARA O STPI

Os alvos devem permitir a pontaria, isto é, a colocação dos fios de retículo da luneta sobre seu centro de forma cômoda e precisa.

Os alvos foram motivo de estudo específico e projetados para os trabalhos em dimensões apropriadas. Também testou-se alvos cujo centro é preenchido com fita adesiva que contém microesferas que permitem a medida de distâncias, com a utilização de distanciômetros eletrônicos cuja portadora tem comprimento de onda no espectro do infravermelho.

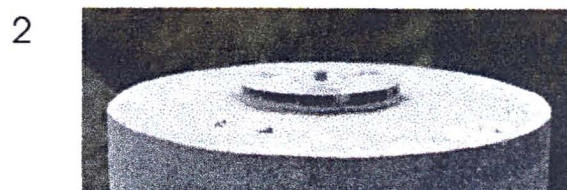
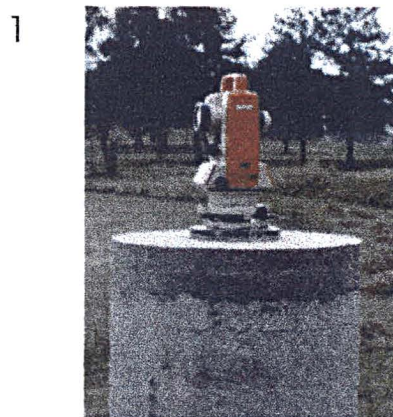


Figura 3.3 Pilar pertencente a base de afetição.

- 1) Fixação do instrumento.
- 2) Sistema de centragem forçada.

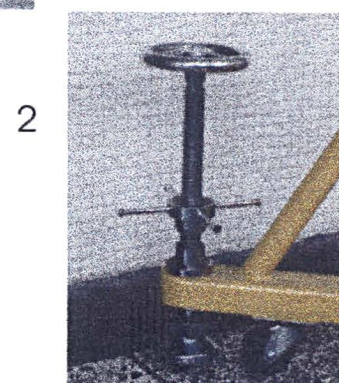
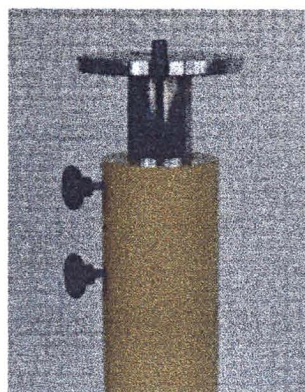
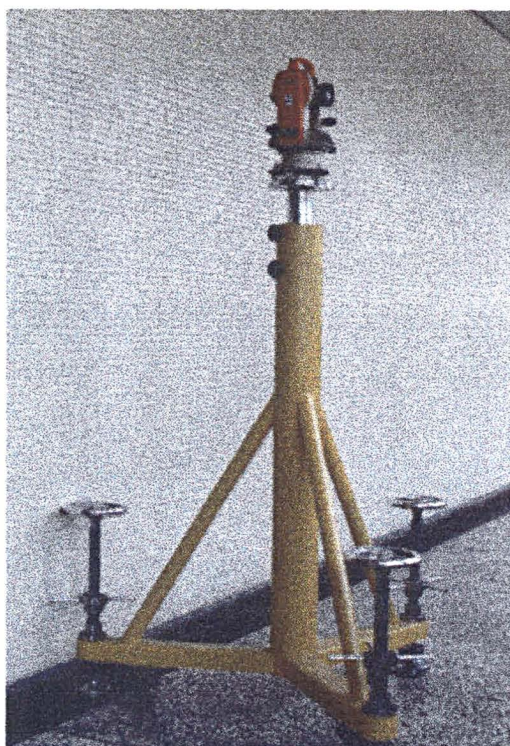


Figura 3.4 Tripé desenvolvido para o STPI

- 1) Sistema de centragem forçada e regulagem de altura.
- 2) Manivela de fixação do tripé no solo.

Nos trabalhos de topografia industrial é possível o uso de diversos tipos de sinais e alvos, principalmente no que concerne à determinação das coordenadas tridimensionais de pontos topográficos situados nas construções, nas máquinas e equipamentos, nos produtos, etc..

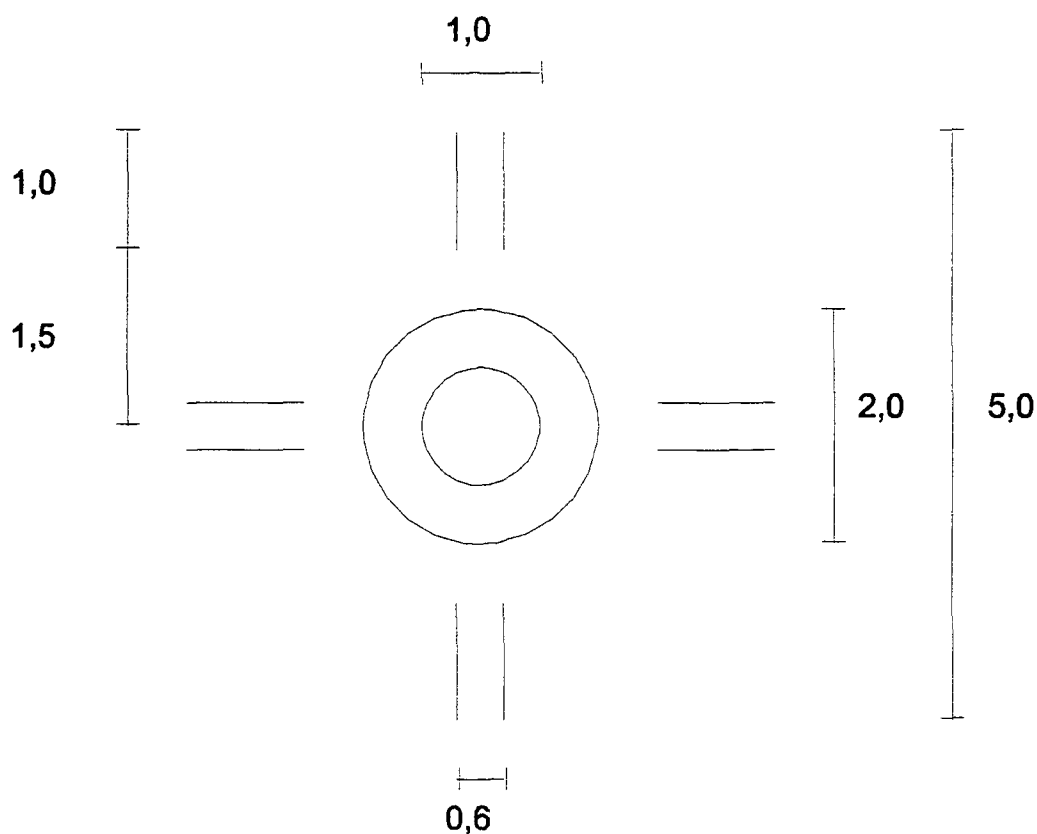


Figura 3.5 Protótipo de um alvo topográfico (dimensões em milímetros).

Um problema a enfrentar é que muitas vezes estes alvos estão sujeitos a intempéries, altas temperaturas, vibrações de máquinas, locais sujeitos a desmoronamentos, etc. No mercado existem diversos tipos disponíveis, desenvolvidos para medidas de ângulos e distâncias, confeccionados de

diversos materiais como por exemplo, os refletores sólidos a base de vidro, os metálicos, plásticos, e que se tornariam na maioria dos casos acima citados antieconômicos quando aplicados em condições particulares dos ambientes industriais.

Com este pensamento o autor desenvolveu um projeto de um alvo para medições de direção, utilizável em distâncias menores que 20m da estação total, estudando seu comportamento quanto a precisão e acurácia [Nadal, 1998].

Na utilização de alvos para as medidas de direções o maior erro a enfrentar é o erro de pontaria, oriundo do limite de difração ou limite de resolução associado ao sistema óptico do teodolito. O erro de pontaria depende de outros fatores tais como:

- (i) deficiências de projeto do alvo;
- (ii) condições de visibilidade e iluminação do alvo;
- (iii) turbulências térmicas do ar;
- (iv) erro de focalização.

A precisão máxima de uma pontaria em função desses erros é da ordem de $10''/M$ onde M é o aumento da luneta ou do telescópio [Chrzanowski, 1977].

Existem alvos que se mostram excelentes para as curtas distâncias, principalmente aqueles que se utilizam de princípios de colimação e auto colimação óptica. Um exemplo deste tipo de alvo pode ser obtido pela colocação de uma lente plano convexa na frente de um alvo. A distância do alvo à lente deve ser igual a distância focal da lente; ao ser observado pela luneta o alvo seria visto como se estivesse no infinito.

Os melhores tipos de alvos são aqueles em forma de V ou de círculos concêntricos. As cores ideais para os alvos são as combinações de amarelo e

preto, os alvos planos são melhores que aqueles em formato cilíndrico ou esférico, pois estes produzem grandes erros de pontaria devido a assimetria das sombras [Chrzanowski, 1977].

A pontaria a um alvo se processa com maior precisão pela bisseção ou enquadramento do que por coincidência [Ollivier, 1955].

A figura 3.5 representa um alvo que se utiliza do princípio de bisseção, cujas dimensões foram calculadas para um teodolito Wild T2 cujo aumento da luneta é de 30 vezes e a espessura do fio de retículo é de 0,005 mm. Os resultados dos cálculos estão indicados no quadro 3.2 onde os elementos tem o seguinte significado: d – distância estação-alvo, a – função da aumento do instrumento em milímetros, b é a largura de enquadramento do alvo em milímetros e c a espessura do fio de retículo projetado no alvo, também em milímetros.

Quadro 3.2 Dimensões de um alvo

d	5m	10m	15m	20m
a	0,1	0,2	0,3	0,4
c	0,1	0,2	0,3	0,5
b	0,3	0,6	0,7	1,3

3.6 ALVOS GRAVADOS EM PLACA DE CRISTAL UTILIZADOS NO STPI PARA DETERMINAÇÃO DE ACURÁCIA DO SISTEMA.

Para determinação da acurácia dos levantamentos utilizou-se uma placa de cristal onde foram gravados através de película fotográfica alvos em forma de cruz, destacados através de circunferências. Estes foram calibrados (nove

Quadro 3.3 – Distâncias calibradas entre os alvos

Direção	Distância (mm)	direção	Distância (mm)
a-b	18,650	b-c	18,644
d-e	18,623	e-f	18,622
g-h	18,643	h-i	18,647
a-d	18,662	b-e	18,632
c-f	18,650	d-g	18,644
e-h	18,625	f-i	18,648
a-e	26.355	b-f	26.334
d-h	26.342	e-i	26.372
b-d	26.351	c-e	26.379
e-g	26.373	f-h	26.341

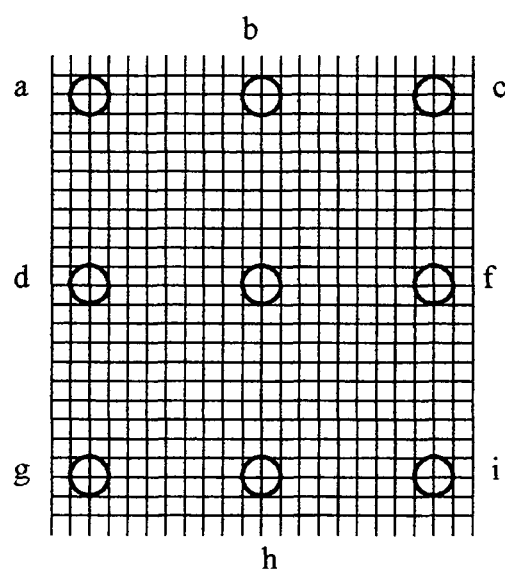


Figura 3.6 Esquema dos alvos na placa de calibração

alvos), (quadro 3.3) através das medições de todas as distâncias possíveis entre eles, utilizando-se o interferômetro HP 5528A do Laboratório de Aferição da UFPR.

Estas distâncias foram ajustadas, obtendo-se as coordenadas dos alvos no plano da placa. Estas coordenadas juntamente com as distâncias foram posteriormente utilizados para verificar a qualidade dos trabalhos.

Deve-se salientar que esta placa foi originalmente desenvolvida como sistema reticular dos projetores do instrumento de restituição multiplex, e que o autor decidiu aproveitar neste trabalho.

3.7 EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS NO STPI

3.7.1 MIRA HORIZONTAL DE INVAR

Utiliza-se no STPI uma mira horizontal de invar confeccionada pela empresa WILD a qual possui comprimento nominal de 2,000m e que foi recentemente calibrada no Laboratório de Aferição da UFPR obtendo-se os resultados apresentados no quadro 3.4.

A mira horizontal de invar é utilizada para fornecer escala aos levantamentos efetivados com será mostrado no capítulo IV. Basicamente consta de uma régua na qual foram gravados dois alvos de forma triangular, cuja distância entre os vértices superiores dos alvos corresponde ao comprimento nominal de 2,000m. Esta régua é colocada na horizontal com o auxílio de um sistema de centragem forçada. Permite a determinação da distância da estação total à mira através da medida do ângulo horizontal paralático (α) subtendido pelos alvos com vértice na estação. Tem como

principal vantagem o fornecimento de uma distância horizontal (d) a qual é obtida pela expressão:

$$d = \cotg (0,5 \alpha) \quad (3.1)$$

Quadro 3.4 Calibração da Mira Horizontal de Invar

LABORATÓRIO DE AFERIÇÃO DA UFPR.
CALIBRAÇÃO DA MIRA HORIZONTAL DE
INVAR DA WILD

data: 16/01/1999 Observador: Pedro e Marlo
Temperatura: 21,5 C Pressão 755,8 mmHg

Observação	lado esquerdo	lado direito	Diferença	Desvio	desvio ²
1	77,902	2077,969	2000,067	-0,007375	5,4391E-05
2	77,981	2078,062	2000,081	0,006625	4,3891E-05
3	77,967	2078,048	2000,081	0,006625	4,3891E-05
4	77,949	2078,031	2000,082	0,007625	5,8141E-05
5	77,954	2078,035	2000,081	0,006625	4,3891E-05
6	77,959	2078,034	2000,075	0,000625	3,9062E-07
7	77,965	2078,031	2000,066	-0,008375	7,0141E-05
8	77,971	2078,033	2000,062	-0,012375	0,00015314
soma			16000,595	-1,819E-12	0,00046787
		Média =	2000,07438	mm	
		erro médio da média =	0,00289049	mm	
		erro médio de uma obs. Isolada =	0,00817553	mm	

Após o ajustamento, o comprimento adotado no trabalho para a mira horizontal de invar é de 2,000074m ±0,000003 m.

A mira horizontal de invar apresenta excelentes resultados para distâncias inferiores a 20m, onde o erro propagado na distância a partir da medida do ângulo paralático horizontal (com precisão de segundos) é de décimos de milímetros.

3.7.2 ESTAÇÕES TOTAIS

Uma estação total pode também ser denominada de taqueômetro eletrônico é classificada basicamente por seu projeto, tipos de dados que armazena, objetivo do *software* contido em seu microprocessador, capacidade de medida de distância (extensão total), precisão da medida de distância e angular.

São utilizados no STPI duas estações totais pertencentes ao Laboratório de Aferição uma TC2002 e uma TC403L ambas da marca Leika. Nos experimentos também foram utilizadas duas estações Leika TC 305. No quadro 3.5 são sintetizadas as principais características destas estações. Todas as estações foram verificadas, retificadas e classificadas pelo Laboratório de Aferição [Medina,1998].

Quadro 3.5 Dados técnicos de precisão das estações totais

a) Medição de distâncias

Desvio Padrão	TC403L	TC2002	TC305
Modo fino	3mm \pm 3 ppm	1mm \pm 1 ppm	3mm \pm 3 ppm
Rastreamento	10mm \pm 3 ppm	5mm \pm 2 ppm	10mm \pm 3 ppm

b) Medição de ângulos

	TC403L	TC2002	TC305
Desvio padrão	10"	0,5"	5"
Resolução exibida	10", 5", 1"	2", 1", 0,5"	10", 5", 1"

Outros dados técnicos das estações podem ser extraídos dos Manuais Técnicos das Estações [Leica, 1998].

3.8 QUALIDADE EXIGIDA NOS TRABALHOS DE TOPOGRAFIA INDUSTRIAL

Os trabalhos de topografia industrial, ainda não foram normatizados, no entanto, a NBR 13133 Execução de Levantamento Topográfico, prescreve características para os levantamentos de poligonais. Os levantamentos mais sofisticados citados nesta norma são denominados de fundamental de alta precisão ou 1ª Ordem, e têm como tolerância planimétrica 1/100000. Ao ser aplicada esta tolerância para um levantamento industrial onde por exemplo, a distância levantada é 5m corresponderia um erro máximo de 0,05 mm.

Em trabalhos tais como controle de vibrações de turbina, auscultações de barragens, medida de deformações de estruturas, etc., especificações quanto a precisão e acurácia das medidas efetivadas variam de acordo com o valor numérico das grandezas a medir. Assim, por exemplo deseja-se medir um deslocamento cujo valor previsto é da ordem de 1mm, é necessário que a precisão e a acurácia do método sejam menores que este valor.

Como exemplo de precisão em trabalhos realizados no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, com participação direta ou indireta do autor pode-se citar:

- a asculção geodésica da região da Barragem Bento Munhoz da Rocha, nos municípios de Pinhão, Cruz Machado e Bituruna onde a precisão final na rede de nivelamento geométrico implantada foi de 1mm por quilômetro; neste trabalho o total de levantamento realizado foi de cerca de 100 km de extensão [Doubek & Gemaël, 1982].

- monitoramento de subsidência no terreno, no município de Almirante Tamandaré, Região Metropolitana de Curitiba, foi realizado através de nivelamento geométrico de alta precisão, com precisão final das redes da ordem de 1mm por quilômetro levantado, e levantamento planimétrico com precisão de 1cm por quilômetro [Nadal, 1995].
- verificação de subsidência de um reservatório elevado, no Município de Paranaguá, no Estado do Paraná, devido a exploração de água do subsolo foi monitorado com estação total, com precisão final das poligonais tridimensionais da ordem de 5mm [Nadal, 1998].

3.9 UTILIZAÇÃO DO STPI NESTA PESQUISA

Pela formação do autor e pela experiência anteriormente adquirida em trabalhos de metrologia, principalmente no monitoramento de deslocamentos, optou-se neste trabalho pela utilização no STPI para monitorar deslocamentos em estruturas na construção civil [Nadal, 1995].

A limitação em alcance do método torna possível a utilização do método para trabalhos em que os instrumentos são colocados a no máximo 20m dos alvos.

Assim foi possível monitorar alguns deslocamentos como medidas de flechas máximas em ensaios de vigas e lajes, deslocamentos diferenciais de fundações, espessuras de trincas e fissuras e seus sentidos.

Os experimentos desenvolvidos serão mostrados e analisados no capítulo V.

O sistema permite uma série muito grande de aplicações, as quais serão desenvolvidas na continuidade do projeto de pesquisa.

CAPÍTULO IV - O MÉTODO DA INTERSEÇÃO À VANTE TRIDIMENSIONAL

4.1 INTRODUÇÃO

Adotou-se neste trabalho o método da interseção à vante tridimensional, tendo-se em conta que este mostra-se eficiente em termos de precisão para levantamentos à curta distância (até 30m) das estações [Allan, 1996].

O método da interseção à vante tridimensional é subdividido nos antigos livros de topografia em dois métodos: interseção à vante e nivelamento trigonométrico. A interseção à vante consiste na determinações das coordenadas cartesianas planas de um ponto A (x, y), o qual geralmente, não é ocupado com o instrumento de medida por ser de alguma maneira inacessível. Já o nivelamento trigonométrico é estudado como um método altimétrico cujo objetivo fundamental é a determinação da cota (z) do ponto A, a partir da medição de um ângulo vertical e de uma distância.

Tratando-se simultaneamente o método da interseção à vante com o nivelamento trigonométrico tem-se como resultado o método da interseção à vante tridimensional, neste caso há que se enfatizar que haverá correlação entre os métodos. A interseção à vante tridimensional pressupõe ainda, o alinhamento do eixo óptico dos instrumentos utilizados, através de processos de colimação óptica. Sob o ponto de vista de análise de dados, este é um dos métodos que está causando uma revolução na Topografia, qual seja, a obtenção de forma única e direta das coordenadas tridimensionais de pontos topográficos.

4.2 PRINCÍPIOS DO MÉTODO DA INTERSEÇÃO À VANTE TRIDIMENSIONAL UTILIZANDO TEODOLITOS OU ESTAÇÕES TOTAIS.

O método da interseção à vante tridimensional utiliza-se de colimação óptica de teodolitos ou estações totais, tendo como princípio a obtenção das coordenadas espaciais associadas a um determinado sistema de coordenadas, por intermédio de cossenos diretores das direções oriundas das estações totais em relação a um alvo topográfico pré determinado.

Nos últimos anos muitos sistemas robotizados foram desenvolvidos providos de teodolitos topográficos especificamente para o uso industrial, como é o caso do ECDS3 desenvolvido pela indústria LEIKA, de forma que se sofisticaram os instrumentos com acessórios e com sistemas de captura automática de grande volume de dados gerados nas medições. Estes equipamentos são capazes de calcular em tempo real coordenadas tridimensionais de pontos topográficos com precisões da ordem de 20 μm , dependendo da geometria e de outras condições. Outros modelos encontrados no mercado são: TOK da Zeiss, RMS da Wild e ECDS da Kern.

O custo destes sistemas instrumentais é da ordem de milhares de dólares americanos, além do custo, do ponto de vista de desenvolvimento científico e tecnológico estes sistemas são apresentados aos engenheiros como “pacotes tecnológicos fechados”.

Partindo-se das premissas acima desenvolveu-se o STPI, que além dos instrumentos enumerados em sua descrição no capítulo III possuirá um sistema de coleta e análise de dados em tempo real. O sistema pode ser caracterizado como uma interseção óptica a partir da orientação mútua dos dois teodolitos

com objetivo de determinação de coordenadas tridimensionais de pontos topográficos previamente escolhidos colocados ou materializados em paredes, equipamentos, objetos, etc.

4.3 PROJETO DE LEVANTAMENTO INDUSTRIAL

Não é usual nos trabalhos de topografia a utilização de um projeto no sentido formal, mas antes são utilizados os conhecimentos, técnicas e métodos na forma de propostas técnicas onde os principais elementos definidores de um levantamento são relacionados e descritos.

Usualmente, a escolha dos métodos, técnicas, equipamentos e definições de equipes, obedecem muito mais a intuição e a critérios práticos, do que critérios técnicos. Em outras palavras tenta-se cumprir os critérios previamente especificados, muito mais por tentativas e erros ou ainda, por excesso de precisão, do que por certeza técnica.

Já, a pré-análise estatística de métodos, instrumentos e precisão consiste principalmente em se estudar, a partir do método dos mínimos quadrados, quais as prováveis elipses ou elipsóides de erros que serão obtidos quando da aplicação de um determinado método, com determinados instrumentos e com determinado critério de repetibilidade instrumental e humana.

De uma forma simplificada a pré-análise é uma aplicação direta do ajustamento no projeto de levantamento, que permite a definição técnica do método, instrumento, equipe, custos e prazo de execução.

As principais fases de um projeto de topografia são:

- a) descrição da finalidade do levantamento;
- b) definição do objetivo do levantamento;

- c) definição das prescrições técnicas do levantamento (precisões, tolerâncias, restrições técnicas, métodos desejados);
- d) listagem dos equipamentos a serem utilizados e dos disponíveis para o levantamento;
- e) pré-análise dos métodos e instrumentos em função das prescrições técnicas;
- f) definição da composição das equipes técnicas para os levantamentos;
- g) definição da logística das operações dos levantamentos;
- h) fluxograma das operações, com os caminhos críticos de projeto, e obtenção de um cronograma projetado;
- i) elaboração dos detalhamentos de projeto;
- j) elaboração dos projetos complementares (segurança do trabalho, liberações econômica financeiras, técnicas de gerenciamento, etc).
- l) custos diretos e indiretos dos trabalhos.

No que concerne a um levantamento industrial, merecem considerações alguns detalhes de projeto, que correspondem a problemas específicos desta área da topografia, principalmente no que se refere a sinalização e estruturas de pontos topográficos, localização dos pontos de interesse para monitoramento, etc..

4.4 DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÕES UTILIZANDO INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL

A configuração mínima da interseção óptica tridimensional é esquematizada na figura 4.1. Esta forma convencional empregam-se dois instrumentos, mas podem ser usados três ou mais como forma de redundância

de dados, tornando possível a pontaria a vários pontos com vistas a determinação de suas coordenadas.

Os dois instrumentos (teodolitos ou estações totais) são apontados um para o outro como forma de orientação, e em seguida para um alvo (ponto topográfico) cujas coordenadas são desejadas. Podem ser usados como alvos: os extremos de uma estadia horizontal de invar, ou dois pontos de um fio calibrado, os quais podem ser colocados tanto na posição horizontal como na vertical, e que são utilizados na determinação da escala do levantamento. Um sistema de coordenadas tridimensionais é associado ao centro de um dos instrumentos e alinhado no plano que contém o zênite e o centro do outro instrumento [Allan, 1988].

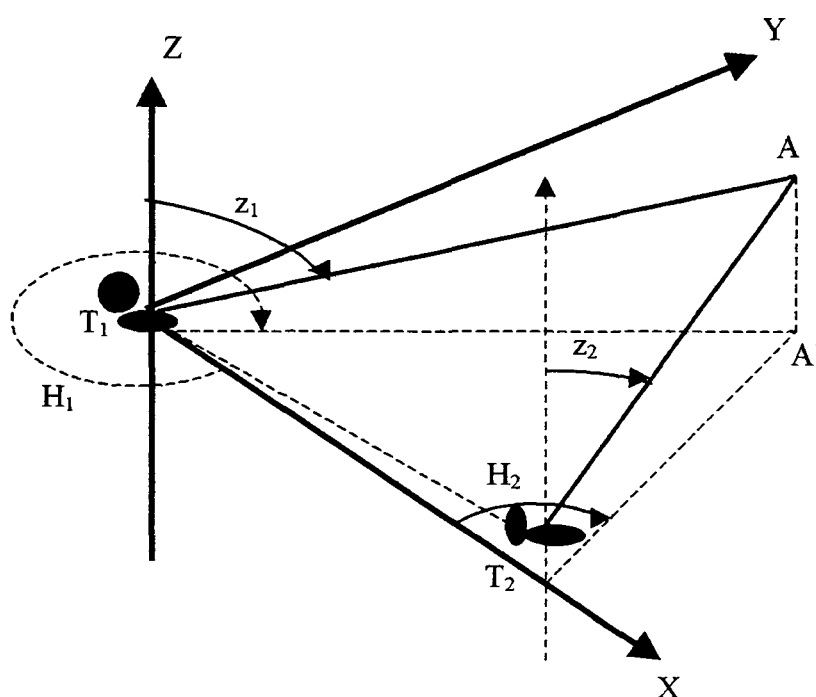


Figura 4.1 Princípio da Interseção Óptica Tridimensional. Fonte [Allan, 1996].

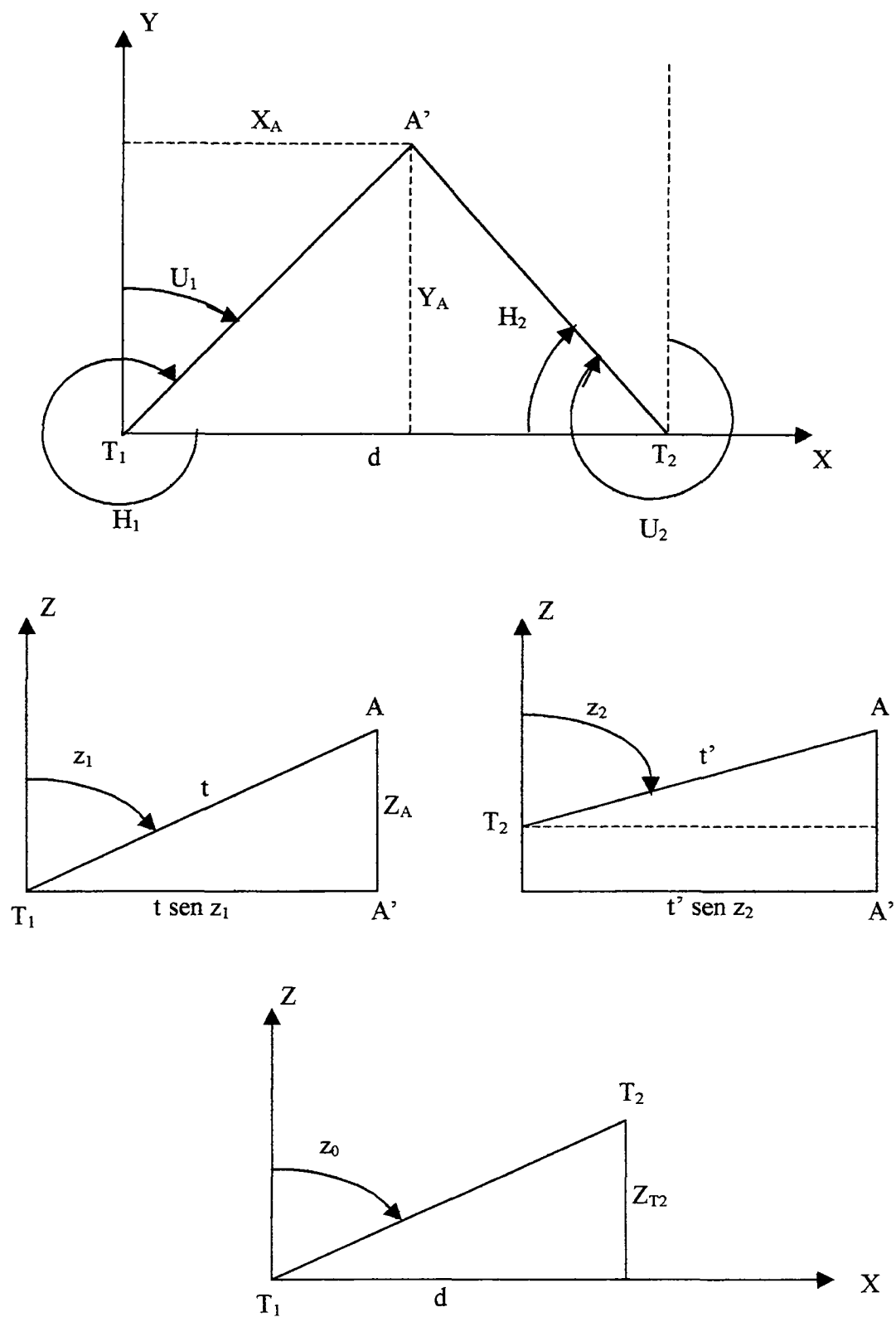


Figura 4.2 Detalhes dos rebatimentos da interseção óptica tridimensional

No caso de utilização de dois instrumentos (T_1 e T_2) (figura 4.1) inicia-se com a pontaria dos fios de retículos de um nos fios de retículos do outro por processo de colimação óptica. Este processo consiste em se colocar a luneta do instrumento T_1 focalizada no infinito; com a luneta do instrumento T_2 focalizam-se os fios de retículo do instrumento T_1 , coincidindo-os com os fios deste. Repete-se o processo para o instrumento T_1 . Infelizmente, ocorre uma dificuldade muito grande de pontaria no sentido de se encontrar um único ponto focal mútuo. Este fato acontece porque é possível efetuar-se a pontaria recíproca dos instrumentos focalizados no infinito de varias formas, principalmente, devido a problemas construtivos das lunetas e variações em suas distâncias focais.

Algumas técnicas então são usadas como a pontaria recíproca em um alvo bem colocado em relação aos instrumentos, ou a pontaria mútua à face lateral da estação total, a qual possui uma marcação em forma de alvo, que indica a posição do eixo secundário.

A partir desta orientação inicial, aponta-se os instrumentos para o ponto A medindo-se a partir de T_1 a direção horizontal H_1 e o ângulo vertical, neste caso distância zenital z_1 ; aponta-se T_2 a seguir para A medindo-se H_2 e z_2 .

Assim, conhecida a distância entre o centro óptico de T_1 e o centro óptico de T_2 , pode-se calcular as distâncias $T_1 A$ (t) e $T_2 A$ (t'), por exemplo, analisando-se as figuras 4.2. Com os ângulos horizontais é possível a obtenção do azimuth das direções $T_1 A$ e $T_2 A$. Com as distâncias, os azimuths e os ângulos verticais é possível a obtenção das coordenadas cartesianas tridimensionais do ponto A.

O ponto A pode coincidir com um dos extremos de uma mira horizontal, de uma estadia de invar, fio de invar, uma régua metálica, etc. Pode-se repetir o procedimento para o outro extremo da mira o ponto B. Conhecida a distância

AB, calcula-se a distância T_1T_2 . Pode-se então, a partir da distância T_1T_2 conhecida, determinam-se as coordenadas de outros pontos topográficos denominados de alvos, medindo-se ângulos horizontais e verticais referentes às visadas individuais a estes pontos.

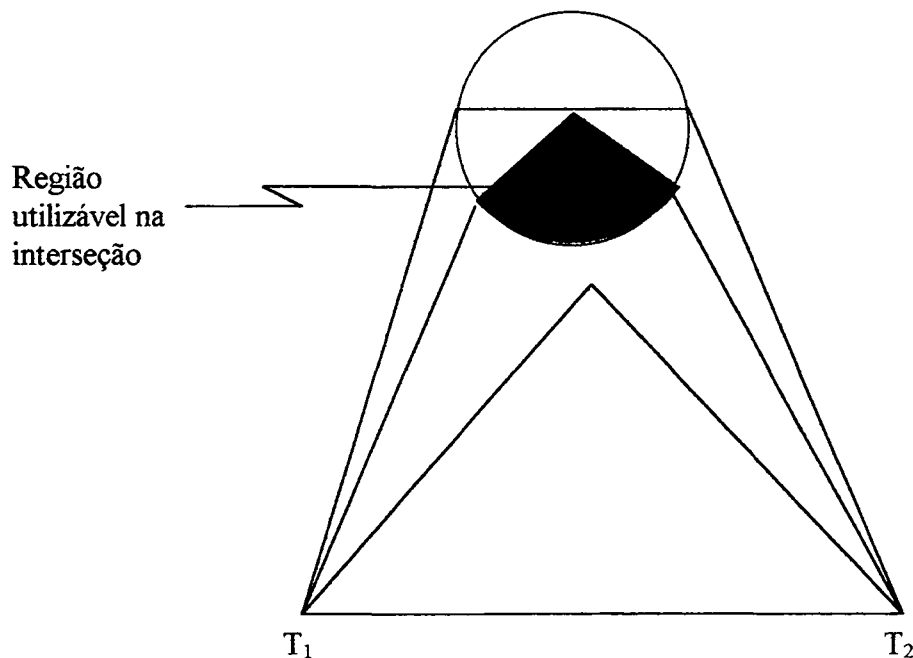


Figura 4.3 Região utilizável em um levantamento por interseção óptica tridimensional

Um problema a ser enfrentado é a geometria do levantamento em função da posição genérica de um alvo. Esta deve ser determinada de forma que os ângulos horizontais formados entre as direções das estações ao ponto objeto tenham valores próximos a 60° (caso ideal), ou de forma que o triângulo plano oriundo do rebatimento dos pontos T_1 , T_2 e A no plano xy seja aproximadamente equilátero. Em um levantamento a vários pontos do terreno, pode ser demonstrado, uma restrição de visibilidade devido a disposição geométrica. Esta poderá ser levantada com a utilização de espelhos ou prismas,

que desviam o caminho óptico entre o ponto e o instrumento. Na figura 4.3 observa-se a área ideal de localização de pontos a serem levantados pelo método da interseção óptica tridimensional.

Nota-se que a localização dos instrumentos (teodolitos ou estações totais), deve ser tal que satisfaça a localização dos pontos a serem levantados. Pode-se também implantar uma rede função de várias localizações dos teodolitos, com a mudança da posição de um instrumento de cada vez.

4.5 PROCESSO DE CÁLCULO DE UMA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.

Desde a introdução generalizada do uso dos computadores na topografia de uma forma genérica utiliza-se o método dos mínimos quadrados nos cálculos e análise dos dados observacionais.

No caso particular da interseção óptica tridimensional, têm-se para cada ponto como observáveis duas direções ou ângulos horizontais e duas direções ou ângulos verticais; tem-se como objetivo a determinação das coordenadas cartesianas tridimensionais do ponto (x, y, z) , havendo portanto, superabundância de observações. Se for usado mais instrumentos, haverá redundância de observações, o que implica numa melhor análise de dados [Allan, 1988]. Uma outra forma de redundância dos dados utilizada neste trabalho, é a mudança de posição da estadia horizontal.

A superabundância de observações nem sempre é suficiente para melhorar a redundância das matrizes a serem invertidas no ajustamento, e na verdade são exigidos novos tipos de observações e não a mera repetição. A forma proposta neste trabalho de se mudar a posição da estadia permite uma

melhora significa na redundância na determinação da medida entre os centros ópticos das estações totais.

Cabe aqui salientar, que não existem estudos conclusivos na literatura demonstrando a supremacia do método dos mínimos quadrados sobre os outros métodos estatísticos, porém, utiliza-se este método de forma generalizada nas ciências geodésicas.

Todo o processamento de dados, utiliza todas as medições com o objetivo de estimar os parâmetros requeridos no trabalho, e se possível estimar os erros estocásticos presentes. Os erros sistemáticos são sem dúvida, os mais inacessíveis e, se possível, são reduzidos a valores negligenciáveis através de processos de calibração instrumental e utilização de duplas pontarias nas medidas angulares. Na realidade, neste tipo de trabalho, prefere-se as medidas de direções às medidas angulares, por permitirem um melhor tratamento de dados como será demonstrado a seguir. Parte do processo de estimativa dos resultados envolve a estimação de matrizes esparsas para as observações. Este é feito em duas etapas: primeiro processam-se os dados observacionais (dados reais); segundo analisam-se os resultados verificando se os modelos estocásticos são aceitáveis.

No caso em pauta ocorre um parâmetro de redundância no processo, isto é, a interseção de dois vetores (linhas de visadas) oriundas das pontarias dos instrumentos ao ponto topográfico objeto do trabalho. Os efeitos da utilização do método dos mínimos quadrados neste problema devem ser tratados com as reservas que o sentido prático impõe [Allan, 1996].

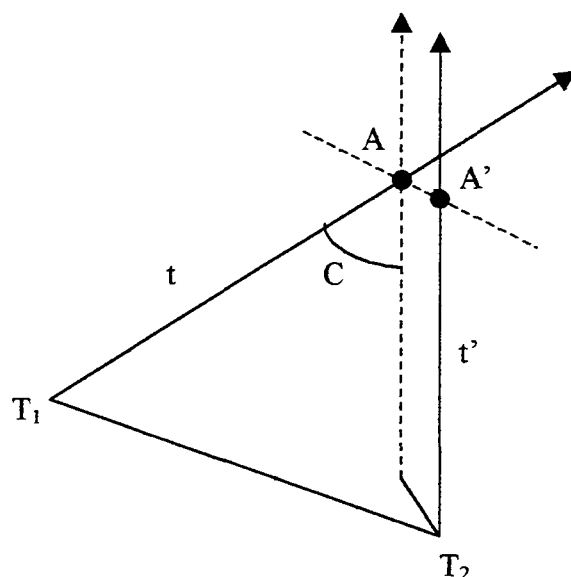


Figura 4.4 Interseção óptica tridimensional – particularidades. Fonte [Allan, 1996]

Assim, a interseção óptica tridimensional pode ser estudada a partir da figura 4.1 onde teodolitos ou estações totais são colocadas nos pontos topográficos T_1 e T_2 ; são orientados um em relação ao outro e apontados ao ponto A.

Nos limbos horizontais medem-se H_1 e H_2 e nos limbos verticais z_1 e z_2 . Para se obter as componentes do vetor que une T_1A , é efetivada uma transformação de origem das direções horizontais, as quais serão medidas a partir do eixo dos Y. A figura 4.2 mostra os rebatimentos das observações em diversos planos, evidenciando aquela transformação.

O sistema de coordenadas tridimensionais é disposto com origem no centro do instrumento T_1 , com o eixo z direcionado segundo o eixo principal deste, com sentido positivo para o zênite; o eixo dos x contido no centro dos instrumentos com sentido de T_1 para T_2 e o eixo y formando um terno cartesiano ortogonal dextrógiro (figuras 4.1 e 4.2), sendo medido o ângulo vertical z_0 de T_1 para T_2 . As coordenadas da estação T_1 serão:

$$X_{T1} = 0; \quad Y_{T1} = 0 \quad \text{e} \quad Z_{T1} = 0$$

já as coordenadas da estação T_2 serão:

$$X_{T2} = d; \quad Y_{T2} = 0 \quad \text{e} \quad Z_{T2} = d \cos z_0$$

As coordenadas do ponto A são obtidas a partir das coordenadas do ponto T_1 pelas expressões:

$$X_A = X_{T1} + t \sin z_1 \sin U_1$$

$$Y_A = Y_{T1} + t \sin z_1 \cos U_1$$

$$Z_A = Z_{T1} + t \cos z_1$$

e, a partir das coordenadas do ponto T_2 pelas expressões:

$$X_A = X_{T2} + t' \sin z_2 \sin U_2$$

$$Y_A = Y_{T2} + t' \sin z_2 \cos U_2$$

$$Z_A = Z_{T2} + t' \cos z_2$$

Os cosenos diretores da direção T_1A são explicitados por:

$$L = \sin z_1 \sin H_1;$$

$$M = \sin z_1 \cos H_1; \tag{4.1}$$

$$N = \cos z_1;$$

Para as componentes do vetor que une T_2A tem-se:

$$L' = \sin z_2 \sin H_2;$$

$$M' = \sin z_2 \cos H_2; \tag{4.2}$$

$$N' = \cos z_2;$$

Se inicialmente, for assumida a distância (d) entre os centro ópticos dos instrumentos $T_1 T_2$ igual a unidade obtém-se:

$$X_{T2} = 1$$

e, $Z_{T2} = \cos z_0$

Os raios vetores $T_1 A$ e $T_2 A'$ (figura 4.4) interceptam-se se o comprimento AA' for igual a zero. As coordenadas de A serão fornecidas pelas expressões:

$$\begin{aligned} X_A &= 0 + L t \\ Y_A &= 0 + M t \\ Z_A &= 0 + N t \end{aligned} \quad (4.3)$$

e,
$$\begin{aligned} X_{A'} &= X_{T2} + L' t' \\ Y_{A'} &= 0 + M' t' \\ Z_{A'} &= Z_{T2} + N' t' \end{aligned} \quad (4.4)$$

Se, efetivamente ocorre a interseção tem-se

$$X_A = X_{A'}; \quad Y_A = Y_{A'}; \quad Z_A = Z_{A'};$$

Dessa igualdade pode-se extrair o valor do módulo de t' , correspondente a distância $T_2 A$:

$$t' = \frac{M}{LM' - ML'} \quad (4.5)$$

e,

$$t = \frac{M'}{LM' - ML'} \quad (4.6)$$

Com a (4.5) na (4.4) calculam-se as coordenadas do ponto A. Procede-se de forma análoga para o ponto B, obtendo-se suas coordenadas (X_B ; Y_B ; Z_B).

O comprimento AB da estadia horizontal é conhecido por processo de calibração, este também pode ser obtido por cálculo em função das coordenadas dos pontos A e B:

$$ab = [(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2]^{1/2}$$

ao se dividir o comprimento calibrado pelo comprimento calculado obtém-se o fator de escala do levantamento:

$$fe = AB/ab$$

este deve ser multiplicado em todas as coordenadas e distâncias obtidas, resultando no valor dimensional das medidas. O procedimento é então estendido a todos os pontos do levantamento.

No caso em que os raios não se interceptam, o ângulo C (Figura 4.5) pode ser calculado pela expressão:

$$\cos C = LL' + MM' + NN'$$

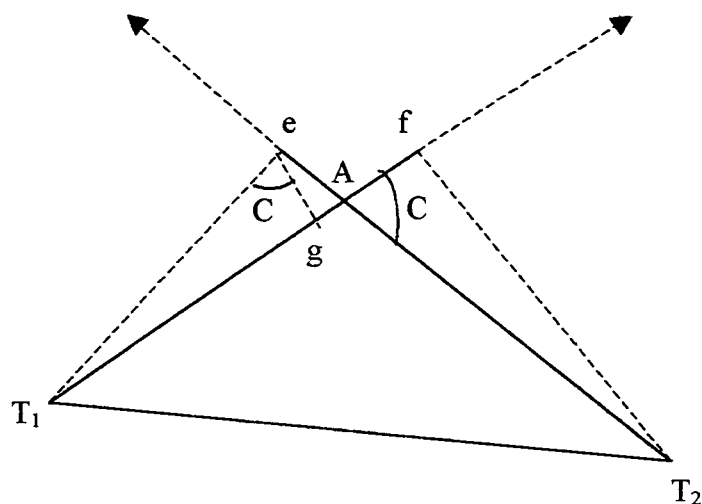


Figura 4.5 Projeções dos raios de interseção

O ponto T_1 projetado ortogonalmente na direção T_2A resulta no ponto e , o ponto T_2 projetado ortogonalmente em T_1A resulta no ponto f , o ponto e projetado em T_1A resulta no ponto g . Designando-se T_1f por p e T_2e por q , e projetando-se T_1T_2 sobre o raio T_1A obtém-se:

$$p = L \Delta X + M \Delta Y + N \Delta Z$$

e,

$$t = \frac{(p - q \cos C)}{\sin^2 C}$$

Das equações (4.3) obtém-se as coordenadas do ponto A . Pode-se obter ainda:

$$t' = q - t \cos C$$

e das equações (4.4) as coordenadas de A'. Usualmente aceita-se as coordenadas do ponto médio do segmento AA' como coordenadas do ponto A.

4.6 ANÁLISE DE DADOS DE UMA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.

Usualmente, utiliza-se o mesmo processo e modelo matemático para pré-análise e análise do levantamento, sendo o primeiro para o projeto e o segundo para a determinação da posição de pontos que compõe o resultado do trabalho e de sua qualidade.

Como tem-se superabundância de observações o sistema de equações resultante não é compatível com o modelo funcional, isto é, não tem solução única. As observações originais representadas pelo vetor L_b , devem ser substituídas por observações ajustadas representadas pelo vetor L_a , afim de que o modelo seja satisfeito. Pode-se obter o denominado vetor dos resíduos dado por:

$$V = L_a - L_b \quad (4.7)$$

Aplica-se o método dos mínimos quadrados para se obter observações ajustadas que satisfaçam ao princípio:

$$\phi = V^T P V = \text{mínimo}$$

onde P é a matriz dos pesos das observações obtida da matriz variância-covariância estimada do vetor das observações, a qual é expressa por:

$$P_{ii} = \left[\frac{1}{\sigma_o^2} \Sigma_{Lb} \right]$$

onde σ_o^2 é a variância de unidade de peso (a priori). Para observações não correlacionadas entre si a matriz P resulta uma matriz diagonal.

Utilizar-se-á neste trabalho o método paramétrico, por sua facilidade e disseminação. Segundo Gemael [1994] o método paramétrico deve ser usado quando os *“valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados”*.

O método paramétrico aplicado às triangulações é muitas vezes denominado de variação de coordenadas. Em nosso caso, através das equações do item 4.5 obtém-se as coordenadas cartesianas tridimensionais aproximadas dos pontos topográficos envolvidos. A seguir é possível a obtenção através destas coordenadas provisórias, dos valores calculados das direções horizontais e verticais observadas e o comprimento do lado medido e, finalmente, em função da natureza da grandeza observada pode-se gerar equações de observação. Cada equação de observação tem como incógnitas as respectivas correções das coordenadas dos pontos topográficos envolvidos. Assim no caso das observações do problema tem-se sempre dois pontos envolvidos. A consequência de tal procedimento é que se pode obter da forma usual do método paramétrico a partir deste ponto as equações normais.

As equações de observação serão retiradas de Hradilek [1975], levando-se em conta um sistema de coordenadas com condições geométricas e físicas, que serão posteriormente simplificadas para o problema, aqui enfocados foram

originalmente deduzidas para trabalhos cujas distâncias observadas sejam menores que 10 km. As fórmulas completas encontram-se em Ashkenazi [972]:

a) Equação de observação para uma direção horizontal α_{ij}

$$v_{ij} = \frac{\text{sen}\alpha_{ij}}{s_{ij}}dx_i - \frac{\cos\alpha_{ij}}{s_{ij}}dy_i - \frac{\text{sen}\alpha_{ij}}{s_{ij}}dx_j + \frac{\cos\alpha_{ij}}{s_{ij}}dy_j + \text{sen}\alpha_{ij} \cot gz_{ij}\xi_i - \cos\alpha_{ij} \cot gz_{ij}\eta_i - o_i + \alpha_{ij}^c - \alpha_{ij}^o \quad (4.7)$$

b) Equação de observação para uma distância espacial l_{ij}

$$v_{ij} = -\cos\alpha_{ij}\text{sen}z_{ij}dx_i - \text{sen}\alpha_{ij}\text{sen}z_{ij}dy_i + \cos\alpha_{ij}\text{sen}z_{ij}dx_j + \text{sen}\alpha_{ij}\text{sen}z_{ij}dy_j - \cos z_{ij}dh_i - \cos z_{ij}dh_j + l_{ij}^c - l_{ij}^o \quad (4.8)$$

c) Equação de observação para distância zenital z_{ij}

$$v_{ij} = -\frac{\text{sen}2(z_{ij} - \gamma_{ij})}{2s_{ij}}\cos\alpha_{ij}dx_i - \frac{\text{sen}2(z_{ij} - \gamma_{ij})}{2s_{ij}}\text{sen}\alpha_{ij}dy_i + \frac{\text{sen}2(z_{ij} - \gamma_{ij})}{2s_{ij}}\cos\alpha_{ij}dx_j + \frac{\text{sen}2(z_{ij} - \gamma_{ij})}{2s_{ij}}\text{sen}\alpha_{ij}dy_j \\ + \cos\alpha_{ij}\xi_i - \text{sen}\alpha_{ij}\eta_i - \gamma_i k_i + \frac{\text{sen}^2(z_{ij} - 2\gamma_{ij})}{s_{ij}}dz_i + \frac{\text{sen}^2(z_{ij} - 2\gamma_{ij})}{s_{ij}}dz_j + \frac{\text{sen}^2(z_{ij} - 2\gamma_{ij})}{s_{ij}}(h_{ij}^c - h_{ij}^o) \quad (4.9)$$

Nestas os elementos têm o seguinte significado:

v_{ij} = resíduos dos dados observados no ponto P_i com respeito ao ponto P_j ;

s_{ij} = distância horizontal entre os pontos P_i e P_j ;

α_{ij} = azimuth da direção $P_i P_j$;

z_{ij} = distância zenital da direção $P_i P_j$;

$2\gamma_{ij}$ = é o ângulo entre as normais ao elipsóide nos pontos P_i e P_j ;

h_i = é a diferença entre a altitude elipsoidal calculada a partir da distância zenital medida ou da altitude normal de Molodenski e a altitude medida em relação ao quase-geoide;

ξ_i = componente meridiana do desvio da vertical;

η_i = componente primeiro vertical do desvio da vertical;

k_i = é o coeficiente de refração;

o_i = é a correção de orientação à direção horizontal medida no ponto P_i ;

dx, dy, dz = são as correções aos valores aproximados das coordenadas dos pontos P_i e P_j .

Se uma observação inclui um ponto do levantamento que será tratado como fixo (suposto portanto, sem erros) no processo de ajustamento, as correções correspondentes dx , dy e dz deste ponto também serão nulas e o correspondente termo da equação de observação desaparece.

O modelo matemático representativo da estrutura dos dados do problema é dado por:

$$F(X_a) = L_a$$

onde as observações ajustadas são função dos parâmetros ajustados, como os modelos não são lineares, lineariza-se pela série de Taylor, considerando-se:

$$L_a = V + L_b$$

e

$$X_a = X_0 + X$$

onde:

X_a é o vetor dos parâmetros ajustados,

X_0 é o vetor dos parâmetros iniciais aproximados,

X é o vetor das correções;

assim,

$$L_b + V = F(X_0) + AX$$

com:

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{x_0}$$

e,

$$L = L_b - F(X_0)$$

Linearizando o modelo obtém-se:

$$AX + L = V \quad (4.10)$$

A solução das equações normais resulta em:

$$X = - (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (4.11)$$

Pode-se então estimar a variância da unidade de peso a posteriori dada por:

$$s_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u} \quad (4.12)$$

onde n é o número de equações e u o número de incógnitas resultando a diferença expressa no denominador nos graus de liberdade do ajustamento. A matriz variância covariância das correções pode ser então obtida:

$$\Sigma_X = s_0^2 (A^T P A)^{-1}$$

A partir da matriz variância covariância definem-se os elipsóides de erros do levantamento.

Testes estatísticos devem ser aplicados para verificar a qualidade do ajustamento, a verificação da existência de erros grosseiros e a permanência de erros sistemáticos dos resíduos, etc.

Assim o teste χ^2 da forma quadrática dos resíduos é utilizado para verificar a qualidade do ajustamento, levando em conta a variância da unidade de peso σ_0^2 definida a “priori” como sendo igual a unidade e a variância estimada a posteriori s_0^2 . A hipótese básica testada é:

$$\sigma_0^2 = s_0^2$$

e, a hipótese alternativa

$$\sigma_0^2 \neq s_0^2$$

Estatisticamente, o valor de χ^{*2} calculado é dado por:

$$\chi^{*2} = \frac{s_0^2}{\sigma_0^2} (n - u)$$

onde n é o número de observações e u o número de incógnitas. O valor de χ^2 teórico é dividido em duas partes, obtido da tabela de distribuição qui-quadrado em função do nível de significância adotado α e do número de graus de liberdade $(n-u)$, resultando em valores de: [Gemael, 1994]

$$\chi_{(n-u), \alpha/2}^2 \text{ e } \chi_{(n-u), 1-\alpha/2}^2$$

Rejeita-se a hipótese a nível de significância α se:

$$\chi^{*2} \leq \chi_{(n-u), \alpha/2}^2 \text{ e } \chi^{*2} \geq \chi_{(n-u), 1-\alpha/2}^2$$

O teste de erros grosseiros “data snoopy” é aplicado após a obtenção da matriz cofatora dos resíduos (Q_v) e dos respectivos números de redundância (r_i) dados por:

$$Q_v = \frac{1}{s_0^2} \Sigma_x$$

os números de redundância correspondem a diagonal principal da matriz:

$$Q_v P = I - N A^{-1} A^T P$$

onde as matrizes ainda não utilizadas tem o seguinte significado:

I: matriz identidade;

$N = A^T P A$: produto matricial indicado.

Com os números de redundância obtém-se os resíduos padronizados w :

$$w_i = \frac{v_i}{\sigma_{ob} \sqrt{r_i}}$$

Nesta equação tem-se:

v_i : resíduo da observação i ;

σ_{ob} : erro médio quadrático da observação;

Para um determinado nível de significância adotado α obtém-se o valor teórico do resíduo padronizado (k). A hipótese básica a ser testada é a de que não existe erro grosseiro na observação se:

$$|w_i| < k$$

e a hipótese básica não é rejeitada.

A detecção de erros sistemáticos não retirados da observação é de difícil consecução. Nadal e Moraes [1999], observaram que antes de se proceder o ajustamento, a avaliação da qualidade das observações pode ser feita pela estatística T^2 de Hotelling, uma generalização multivariada da estatística t de Student, o que requer uma estrutura matricial denominada “matriz de dados”, cujas linhas são as n observações e cujas colunas são as p variáveis, com o objetivo final de obter o vetor médio e a matriz covariância amostral.

O vetor médio e a matriz covariância amostrais compõe a expressão que descreve o contorno de probabilidade constante. O eixo maior de um contorno situa-se na direção da variância amostral máxima.

A fim de verificar a isotropia, isto é, a igualdade dos semi-eixos sob um certo nível de significância, efetua-se o teste para a igualdade dos valores

próprios. A não igualdade indica a existência de erros sistemáticos nos resíduos, os quais devem ser retirados para posterior aplicação do método dos mínimos quadrados.

CAPITULO V - APLICAÇÕES E ENSAIOS COM O MÉTODO DESENVOLVIDO

5.1 INTRODUÇÃO

Os ensaios desenvolvidos neste trabalho foram efetivados principalmente no Laboratório de Aferição do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Alguns ensaios específicos com aplicações na Engenharia Civil, foram realizados no Laboratório de Materiais e Estruturas do Setor de Tecnologia da UFPr. Foram utilizados equipamentos destes laboratórios, tais como estações totais, teodolitos eletrônicos, teodolitos convencionais, miras de invar, prensas hidráulicas para ensaio de flexão, etc..

Procurou-se ao longo dos ensaios evidenciar a precisão dos levantamentos com vistas a futuras aplicações na Engenharia Civil, principalmente na medida recalque de fundações e deslocamentos de Estruturas, evidenciando-se tanto o módulo dos deslocamentos como seus sentidos e direções.

Alguns dos trabalhos publicados durante o desenvolvimento desta pesquisa dizem respeito ao monitoramento de estruturas geológicas e de concreto armado [Rosa et alli,1998], [Nadal,1995].

Neste ensaios procurou-se sempre um estudo preliminar, através de pré-análise, planejamento e projeto do levantamento e após os trabalhos comparou-se com os resultados obtidos a partir das observações.

Testes estatísticos para detecção de erros grosseiros, e para determinação da qualidade do ajustamento foram efetivados.

5.2 PRÉ-ANÁLISE PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS CENTROS ÓPTICOS DE DOIS TEODOLITOS.

Como exemplo de planejamento técnico de um levantamento por interseção à vante tridimensional inicialmente efetuar-se-á a pré-análise da determinação da distância entre os centros ópticos de dois teodolitos. No levantamento representado pelo croqui (figura 5.1); mediu-se todas as direções horizontais representadas por linhas interrompidas, são conhecidas as distâncias correspondentes ao comprimento da mira horizontal de invar (AB e CB). Deseja-se a distância entre os centros ópticos dos teodolitos T_1 e T_2 . A precisão nominal das direções obtidas com os teodolitos é de $1''$.

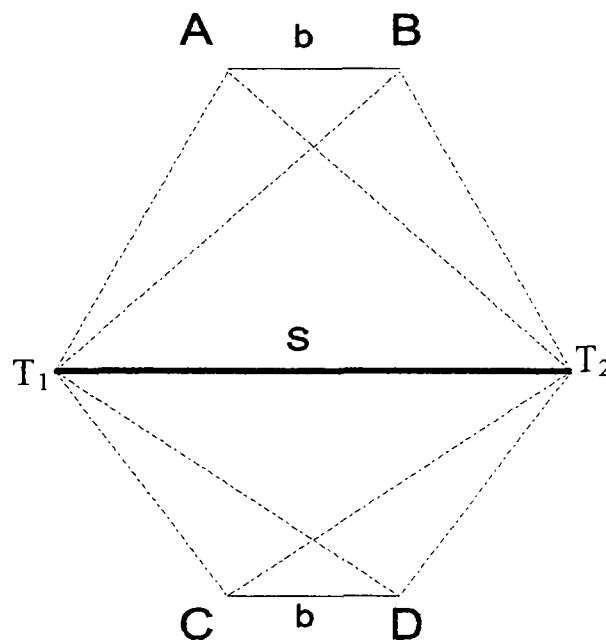


Figura 5.1 – Croqui do levantamento.

O sistema de coordenadas adotado terá origem no centro óptico do teodolito instalado no ponto T_1 , o eixo dos x coincidirá com a direção T_1T_2 , com sentido positivo para o ponto T_2 e o eixo dos y será ortogonal no sentido dextrógiro. As coordenadas dos pontos extremos da mira de invar serão consideradas constantes e iguais a:

ponto	x(m)	y(m)
A	2,000	4,000
B	4,000	4,000
C	2,000	-3,000
D	4,000	-3,000

As coordenadas aproximadas dos centros ópticos dos teodolitos serão:

ponto	x(m)	y(m)
T ₁	0,000	0,000
T ₂	6,000	0,000

Os valores aproximados das direções serão:

DIREÇÃO	MEDIDA	DIREÇÃO	MEDIDA
T ₁ – T ₂	0° 0' 0"	T ₂ – T ₁	0° 0' 0"
T ₁ – A	296° 33' 55"	T ₂ – A	45° 00' 00"
T ₁ – B	315° 0' 0"	T ₂ – B	63° 26' 05"
T ₁ – C	36° 52' 10"	T ₂ – C	323° 07' 50"
T ₁ – D	56° 18' 32"	T ₂ – D	303° 41' 28"

Aplicando-se o método das variações das coordenadas, adotando-se como erro provável nas medidas angulares 3σ isto é 3" [Chrzanowski, 1977], obtém-se para a solução do problema:

$$X^T = [x_{T1} \ y_{T1} \ x_{T2} \ y_{T2}]$$

$$X^T = [-0,000004 \ -0,000016 \ 5,999993 \ 0,000071]$$

A variância de unidade de peso a priori foi adotada como sendo igual a unidade e a variância calculada a posteriori resultou em:

$$\sigma_0^2 = 0,209$$

O teste de χ^2 da forma quadrática dos resíduos evidenciou a hipótese inicial onde variância da unidade de peso a priori é igual à posteriori, sendo esta aceita ao nível de significância de 5%.

$$0,075 \leq \chi^2 \leq 1,727$$

A matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados resultou em:

$$\Sigma L_a = \begin{vmatrix} 7,435 \times 10^{-10} & -2,782 \times 10^{-11} & 1,851 \times 10^{-11} & 2,059 \times 10^{-10} \\ 4,062 \times 10^{-10} & 1,094 \times 10^{-10} & 1,338 \times 10^{-10} & \\ 2,932 \times 10^{-10} & 1,013 \times 10^{-10} & & \\ 5,838 \times 10^{-10} & & & \end{vmatrix}$$

Os parâmetros das elipses relativas de erros para as estações T_1 e T_2 resultaram na tabela abaixo:

parâmetro	Estação T_1	Estação T_2
semi-eixo maior	0,000027m	0,000031m
semi-eixo menor	0,000020m	0,000025m
Ângulo crítico	31,49°	30,54°

A lei de propagação de covariâncias nos fornece o valor da precisão da distância AB resultou em:

$$\sigma_{AB} = \pm 0,000032m.$$

Nota-se portanto, que do ponto de vista de pré-análise ao se utilizar teodolitos similares ao WILD T2, nestas condições geométricas, pode-se obter a distância entre centros ópticos com precisão da ordem de $32\mu\text{m}$.

Na realidade, pode-se nesse tipo de medição utilizar-se duas miras horizontais de invar, ou uma mira colocada nas posições especificadas.

5.3 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS CENTROS ÓPTICOS DE DUAS ESTAÇÕES TOTAIS.

Uma medição similar a mostrada no item 5.2, porém, utilizando somente uma posição da mira de invar, aplicando-se interseção óptica é mostrada a título de exemplo. Os dados observacionais relativos a colocação da régua em uma das posições AB do croqui são mostrados no quadro 5.1 a seguir.

Cada direção foi medida em quatro séries de reiteração, com ângulo reiterador igual a 45° . O procedimento de reiteração foi efetivado em dupla posição da luneta. Na verdade, o processo de reiteração é indicado quando se percorre a gravação do limbo horizontal, no caso de limbos eletrônicos, os fabricantes declaram no manual “não existirem erros de gravação”. O processo foi adotado no trabalho como forma de repetição de observações. Os erros médios quadráticos das médias obtidos foram da ordem de $\pm 5''$. Os cálculos foram efetivados aplicando-se a seqüência proposta no capítulo IV. Os dados observacionais são apresentados no quadro 5.1. Com esses dados foi possível a obtenção dos resultados discriminados a seguir.

Quadro 5.1 Observações efetivadas dia 02/02/1999.

Estação: I		Andrea		TC2002				
Ponto visado		Pd	Pi	Dif	Media	Média reduzida	desvio	V^2
II	0		179,9871111	-46,4	359,9935556	0	0	0
A	55,0946944	4	235,0936944	-3,6	55,09419444	55,10063889	6,525	42,575625
B	82,6459166	7	262,6444722	-5,2	82,64519444	82,65163889	5,7625	33,20640625
II	45		224,9922222	-28	44,99611111	0	0	0
A	100,095277	8	280,0945833	-2,5	100,0949306	55,09881944	-0,025	6,25000E-04
B	127,646138	9	307,6451389	-3,6	127,6456389	82,64952778	-1,8375	3,37640625
II	90		269,9941944	-20,9	89,99709722	0	0	0
A	145,098055	6	325,0970833	-3,5	145,0975694	55,10047222	5,925	35,105625
B	172,649916	7	352,6483611	-5,6	172,6491389	82,65204167	7,2125	52,02015625
II	135		314,9970278	-10,7	134,9985139	0	0	0
A	190,094138	9	10,09363889	1,8	190,0938889	55,095375	-12,425	154,380625
B	217,646027	8	37,64488889	4,1	217,6454583	82,64694444	-11,1375	124,0439063
444,709375								
Média	II		0		A=	4		
	A		55,09882639		T=	3		
	B		82,65003819		erro médio	4,304597228	da média geral	
					erro médio	8,609194455	de uma obs Isolada	
Estação: II		RODRIGO		TC403L				
Ponto visado		Pd	Pi	Dif	media	Média reduzida	desvio	V^2
II	0		179,9894444	-38	359,9947222	0	0	0
A	281,088611	1	101,0880556	2	281,0883333	281,0936111	6,125	37,515625
B	306,778888	9	126,7780556	3	306,7784722	306,78375	6,375	40,640625
II	45		224,9958333	-15	44,99791667	0	0	0
A	326,088611	1	146,0894444	-3	326,0890278	281,0911111	-2,875	8,265624999
B	351,779166	7	171,7794444	-1	351,7793056	306,7813889	-2,125	4,515625
II	90		269,9969444	-11	89,99847222	0	0	0
A	11,0930555	6	191,0933333	1	11,09319444	281,0947222	10,125	102,515625
B	36,7825		216,7836111	4	36,78305556	306,7845833	9,375	87,890625
II	135		315,0011111	4	135,0005556	0	0	0
A	56,0902777	8	236,0872222	-11	56,08875	281,0881944	-13,375	178,890625
B	81,7791666	7	261,7783333	-3	81,77875	306,7781944	-13,625	185,640625
645,875								
Média	II		0		A=	4		
	A		281,0919097		T=	3		
	B		306,7819792		erro médio	5,187625501	da média geral	
					erro médio	10,375251	de uma obs	

a) Coordenadas ajustadas dos pontos

Ponto	x(m)	Y(m)
I	0,000	0,000
II	3,155271	0
A	2,463108	3,530628
B	0,464293	3,599466

b) distância AB determinada e seu erro médio quadrático:

$$d_{AB} = 3,155272\text{m} \pm 0,000024\text{m}$$

c) Elipse de erros nas estações I e II, supondo-se os pontos A e B fixos:

Parâmetro	Estação I	Estação II
Semi-eixo maior a	0,000027m	0,000031m
Semi-eixo menor b	0,000031m	0,000025m
Ângulo crítico	30,25°	31,64°

Os resultados foram aceitos a nível de significância de 5% não havendo erros grosseiros.

Foram efetivados testes para varias configurações geométricas e para distâncias entre estações totais variando de 1,5m a 8m. No quadro 5.2 a seguir sintetizam-se os resultados obtidos.

Quadro 5.2 Resultados dos testes de determinação de distâncias entre estações totais

Distância Medida	Erro médio quadrático	Semi eixo maior a (m)	Semi eixo menor b (m)	Ângulo Crítico
1.512356	0,000046	0,000008	0,000012	22,66°
		0,000026	0,000009	29,78°
2.898457	0,000012	0,000032	0,000045	56,45°
		0,000041	0,000052	55,91°
4,464612	0,000022	0,000012	0,000044	29,88°
		0,000021	0,000039	32,57°
6,232897	0,000041	0,000028	0,000039	31,12°
		0,000015	0,000027	24,89°
7,895978	0,000058	0,000032	0,000022	12,28°
		0,000025	0,000034	45,85°

Neste quadro aparecem nas colunas referentes aos semi-eixos maior e menor da elipse de erro e ao do ângulo crítico na linha superior o dado referente a estação I e na linha inferior o dado referente a estação II.

5.4 TESTE DE ACURÁCIA COM ALVOS GRAVADOS NA PLACA DE CALIBRAÇÃO

No sentido de se determinar a acurácia de um levantamento utilizou-se os nove alvos gravados na placa de calibração descrita no item 3.5. à distância e posições variadas das estações.

Foram realizados 8 testes colocando-se o alvo de tal forma que fossem determinadas as coordenadas tridimensionais dos nove alvos. Adotou-se um sistema de coordenadas cuja origem situa-se no ponto g, com eixos paralelos aos eixos da interseção óptica tridimensional, de forma que os resultados pudessem ser comparados. Com as coordenadas resultantes procedeu-se ao cálculo da distância tridimensional entre os alvos as quais foram comparadas com as distâncias calibradas indicadas no quadro 3.3.

Os resultados podem ser sintetizados no quadro 5.3. Verifica-se que a diferença máxima resultou em 153 μ m na distância entre os alvos i-f.

Quadro 5.3 Resultados das comparações efetivadas com alvos gravados na placa de calibração

Experimento	Distância Estação I – Alvo a	Discrepância mínima / alvos	Discrepância máxima / alvos
1	2,515m	12 μ m/e-f	49 μ m/e-i
2	3,961	5 μ m/a-b	21 μ m/e-g
3	5,198	19 μ m/b-c	52 μ m/h-i
4	6,056	32 μ m/a-d	38 μ m/f-h
5	6,325	45 μ m/a-e	153 μ m/i-f
6	6,952	28 μ m/a-b	41 μ m/g-h
7	7,105	51 μ m/d-e	62 μ m/e-i
8	7,112	31 μ m/a-b	49 μ m/c-f

Todos estes experimentos foram realizados com os mesmos instrumentos as estações totais TC2002 e TC403, porém, não foram utilizados os mesmos observadores em todas as observações. As observações 2, 4 e 8 foram efetivadas por iguais

observadores. As observações foram efetivadas em dupla posição da luneta e o tempo médio despendido para um levantamento completo é de cerca de seis horas de trabalho (considerando-se quatro reiterações e tempo de análise final dos dados).

5.5 ESTUDOS DE VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM AMBIENTE INDUSTRIAL

Com a finalidade de determinar-se a influência que uma fonte anômala de calor colocada em um ambiente pode causar nas observações de direções horizontais e verticais em termos de refração atmosférica, efetuaram-se alguns experimentos no Laboratório de Aferição. Este fato é muito comum em levantamentos industriais onde muitas vezes depara-se com o problema de monitoração de produtos, deslocamentos, vibrações, etc, com alvos topográficos colocados próximos a máquinas e equipamentos em funcionamento, e que geralmente emitem calor.

Os testes efetivados no Laboratório de Aferição consistiram na utilização do sistema μ Das ST3 que consiste em quatro sensores eletrônicos que permitem medidas de temperatura. Estes sensores foram ao início de cada teste calibrados com termômetros cuja precisão é de $0,1^{\circ}$ C. Dois sensores foram fixados em uma mira centimétrica de nivelamento geométrico. Um dos sensores foi colocado na marcação correspondente a 0,50m e outro na 2,50m, tornando possível a determinação de um gradiente vertical de temperatura por medição direta da temperatura em alturas diferentes e conhecidas, e gradientes horizontais através de deslocamentos do conjunto em vários pontos da sala do laboratório, conforme foi esquematizado na figura 5.2. Um terceiro sensor foi colocado no centro geométrico do laboratório ponto 5, a altura de 1,50m do piso, tornando possível o monitoramento contínuo da temperatura numa posição fixa.

Um primeiro experimento consistiu em se fixar os três sensores no ponto 5, monitorando-se continuamente a temperatura durante 36h. Os resultados deste experimento podem ser visualizados no gráfico 5.1. Nota-se ao examinar este gráfico que há estabilidade térmica do ambiente em função de que este laboratório é isolado termicamente por placas de isopor. Acontecem dois picos de temperatura quando da saída dos operadores da sala após ser ligado o sistema de aquisição e no retorno dos mesmos no final do período para a descarga dos dados em microcomputador.

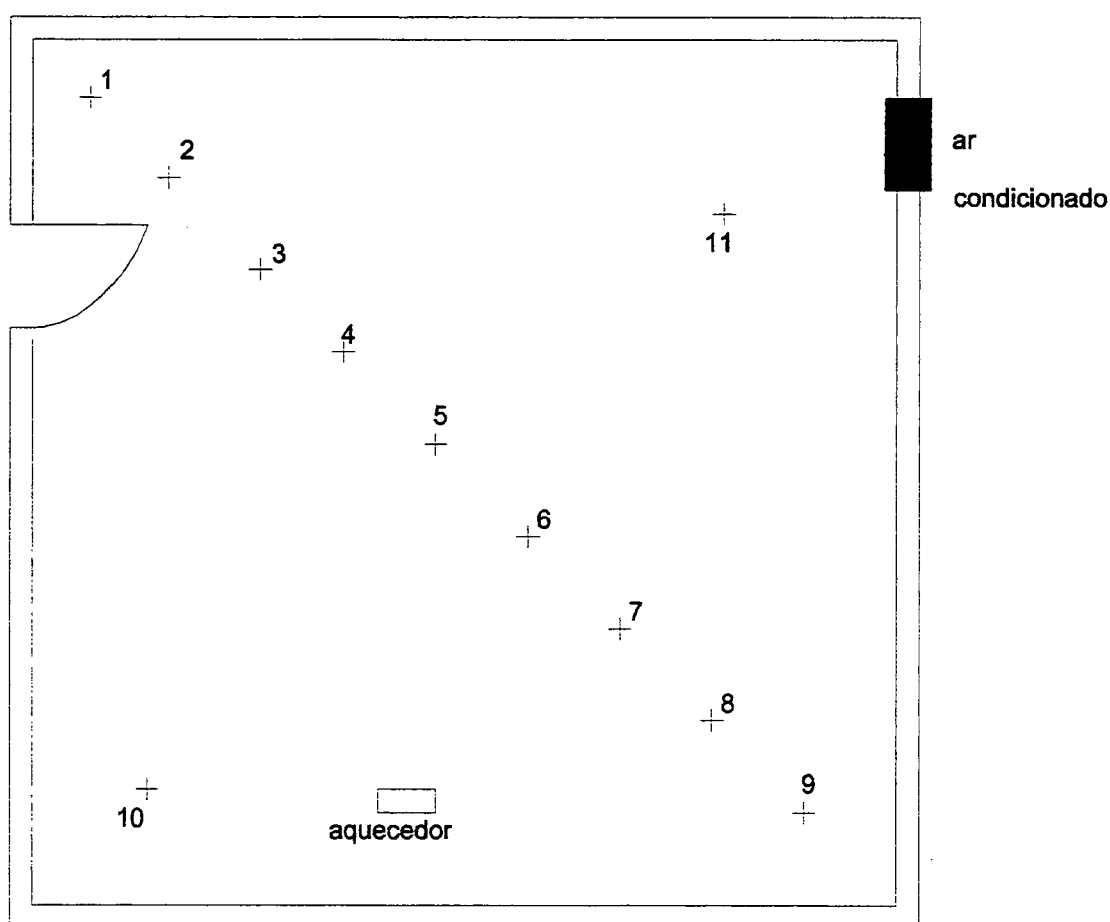
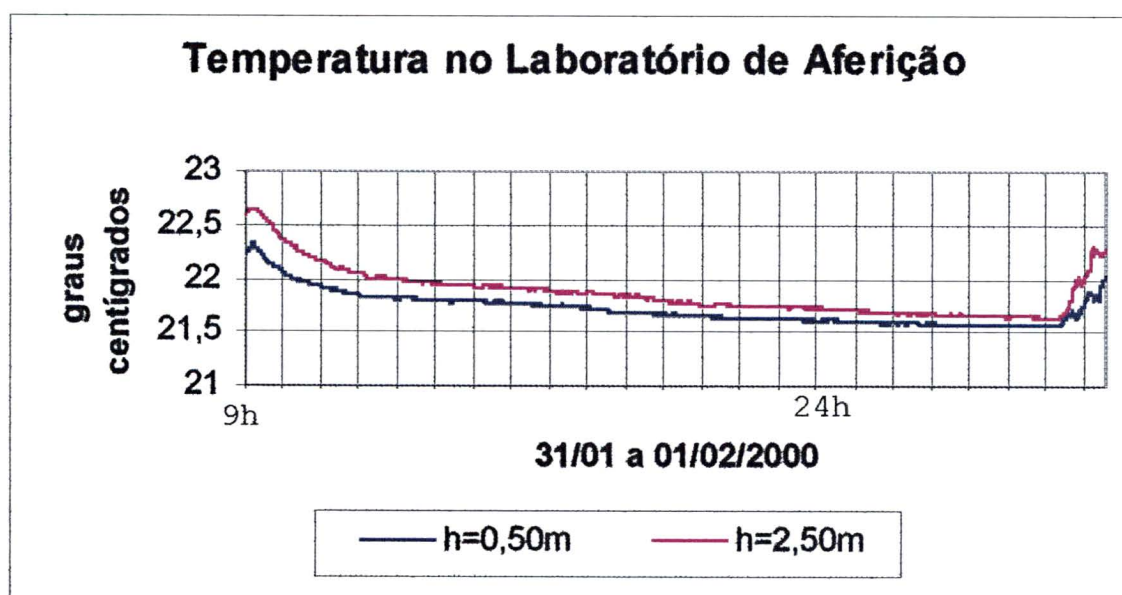


Figura 5.2 Planta do Laboratório de Aferição evidenciando os pontos ocupados com os sensores de temperatura.

No gráfico 5.1 o afastamento das duas curvas mostra que a temperatura a 2,50m de altura do piso é maior que a 0,50m deste, como as curvas deslocam-se aproximadamente em paralelo, observa-se a tendência de manutenção de um pequeno gradiente cujo valor é da ordem de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C/m}$.

Gráfico 5.1 – Variação da temperatura em 36h de monitoramento no Laboratório de Aferição



Após a estabilização referida anteriormente, retornou-se ao laboratório, tendo como perturbação térmica somente a presença do operador, mediu-se o gradiente durante 5min em cada ponto da sala, como indicado na figura 5.2, obtendo-se o gráfico 5.2. Nota-se que a presença do operador na sala gera pequenas variações no gradiente vertical ao longo de toda sala variando de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ a $0,3\text{ }^{\circ}\text{C/m}$.

Um novo experimento consistiu em desligar-se o condicionador de ar e ligar-se um aquecedor elétrico posicionado na sala (figura 5.2), estudando-se a disseminação desse calor anômalo durante algumas horas. Pode-se notar no gráfico 5.3 suas

consequências com variações mais pronunciadas do gradiente vertical ao longo da sala, sendo maiores nas proximidades da fonte.

Gráfico 5.2 Variação do gradiente vertical de temperatura no Laboratório de Aferição climatizado.

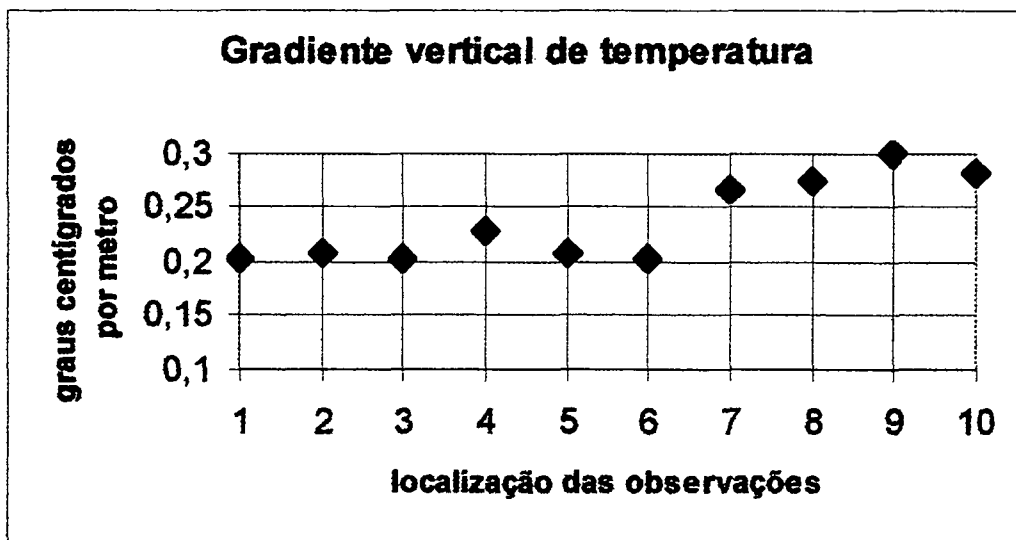
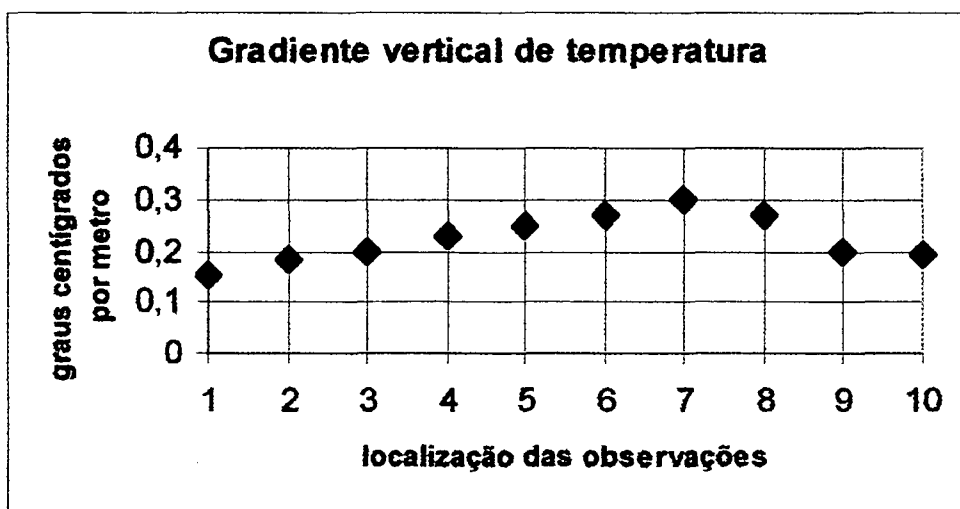


Gráfico 5.3 Variação do gradiente vertical de temperatura no Laboratório de Aferição com fonte anômala de calor



Durante este experimento, foram também efetuadas medições de direções horizontais e verticais em dupla posição da luneta a alvos posicionados próximo à fonte, além do instante das observações e das temperaturas na estação total e no alvo. O instrumento utilizado foi a estação total TC2002, os resultados são apresentados nos gráficos 5.4 e 5.5. No gráfico 5.4, no eixo dos y representou-se o afastamento da média de uma direção observada (considerando a posição direta e invertida da luneta) em relação a média da primeira direção observada. No gráfico 5.5 no eixo dos y representou-se a temperatura em graus centígrados. Em ambos os gráficos no eixo dos x representou-se o instante correspondente a média da observação contado continuamente desde a inicial.

Gráfico 5.4 Variação de uma direção horizontal e uma direção vertical em função da variação de temperatura.

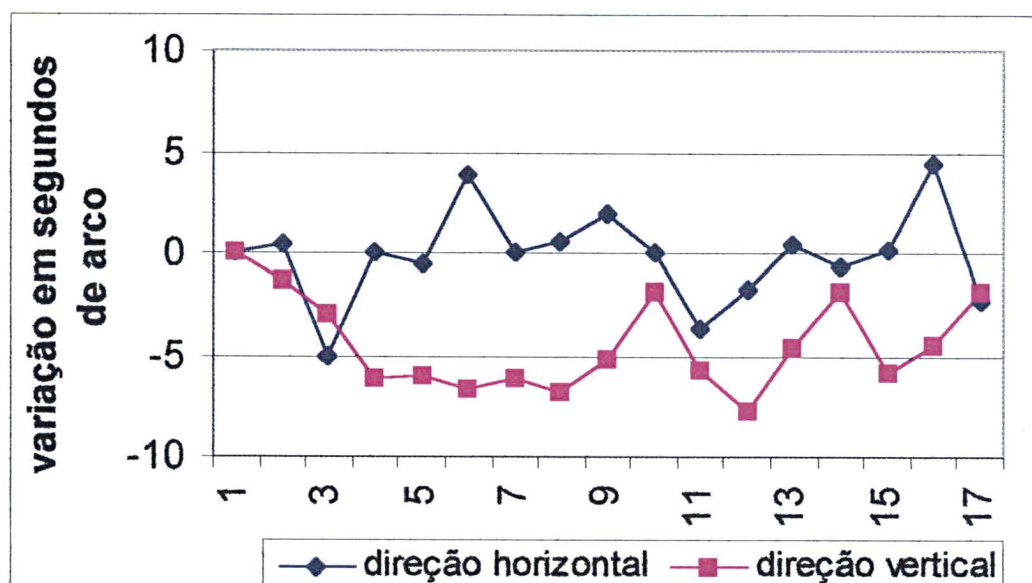
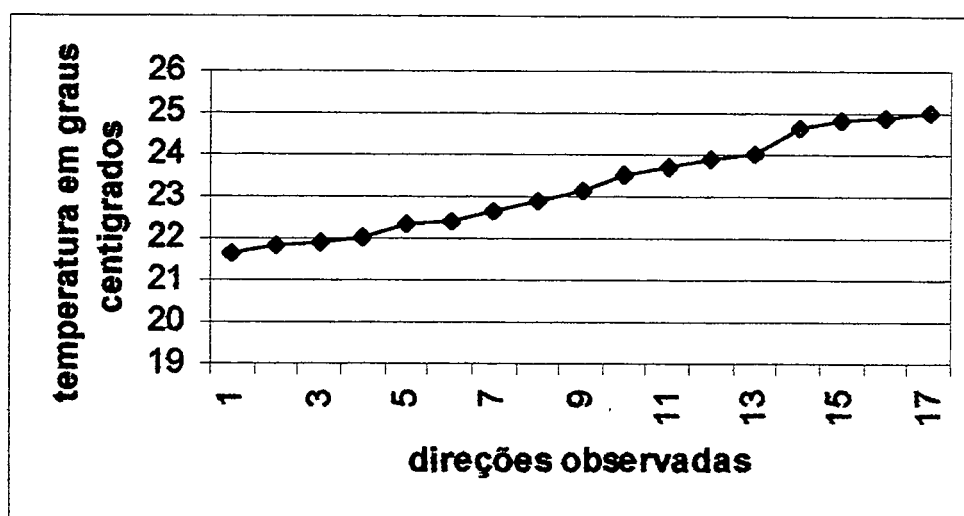


Gráfico 5.5 – Variação da temperatura induzida pela fonte anômola nas proximidades do alvo.



É possível inferir uma relação direta entre o aumento da temperatura e o aumento da refração que causa uma diminuição no valor da direção vertical como mostram os gráficos 5.4 e 5.5. O sentido da refração lateral exige um estudo completo de distribuição e transmissão de calor no ambiente.

Para se obter uma propagação da variação de temperatura na refração atmosférica, a qual deve ser somada a distância zenital observada, derivou-se a equação 2.1 (fórmula de Laplace) em relação à temperatura, resultando em:

$$\mathcal{R} = -\alpha_{0,760} \frac{P}{760} \frac{273}{(273+T)^2} \operatorname{tg} z \partial T - \alpha_{0,760}^2 \frac{P^2}{760^2} \frac{273^2}{(273+T)^3} \operatorname{tg}^3 z \partial T$$

Supondo-se que o raio óptico irá atravessar todas as camadas da atmosfera terrestre; tendo-se em conta que as direções verticais normalmente utilizadas na topografia tem valor muito próximo a 90° , adotando-se a temperatura e pressão

atmosférica média de Curitiba, tem-se como exemplo: uma distância zenital de 89° , uma temperatura de 22°C e pressão atmosférica 685 mmHg, supondo-se uma variação de temperatura de 1°C , resultaria uma variação de refração de $-17,6''$.

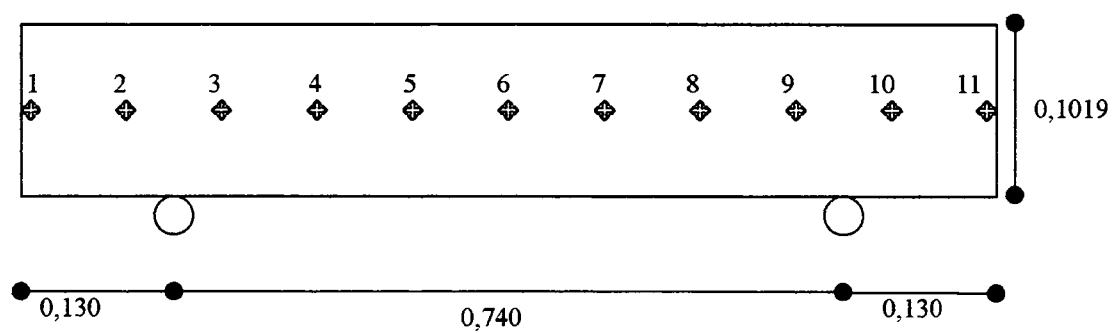
Similarmente, para a refração atmosférica horizontal, obteve-se a seguinte equação:

$$\partial\gamma = -8'' \frac{P.S}{(273 + T)^4} \frac{\Delta T}{\Delta X} \partial T$$

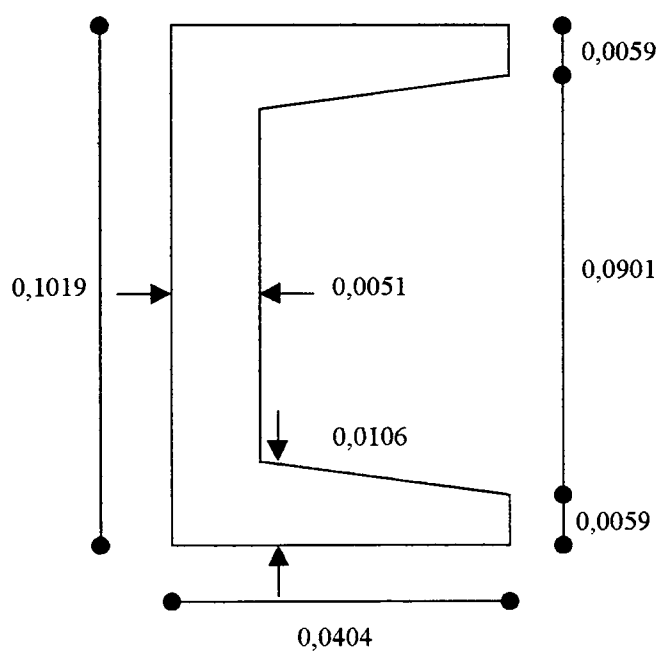
Nota-se que a partir das expressões acima pode-se modelar a variação da refração em função da variação da temperatura. Expressões similares podem ser obtidas para a pressão atmosférica e umidade relativa do ar. Para um estudo aprofundado no tema sugere-se Brunner [1984].

5.6 DETERMINAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS DE ALVOS FIXADOS EM UMA VIGA DE AÇO EM FUNÇÃO DE CARGAS NELA APLICADAS

No início do ano de 2000 o autor propôs aos pesquisadores do LAME - Laboratório de Materiais e Estruturas do Setor de Tecnologia da UFPr, um ensaio com viga de aço, o qual consistiu no acompanhamento do ensaio a flexão de uma viga de aço, com 1,00m de comprimento, colocada sobre apoios cilíndricos de forma simplesmente apoiada como se mostra esquematicamente na figura 5.3. Nesta figura mostram-se também a posição aproximada onde foram colocados cada alvo topográfico utilizado e sua numeração.



Seção longitudinal da viga de aço ensaiada (ênfatizando os alvos nela colocados)

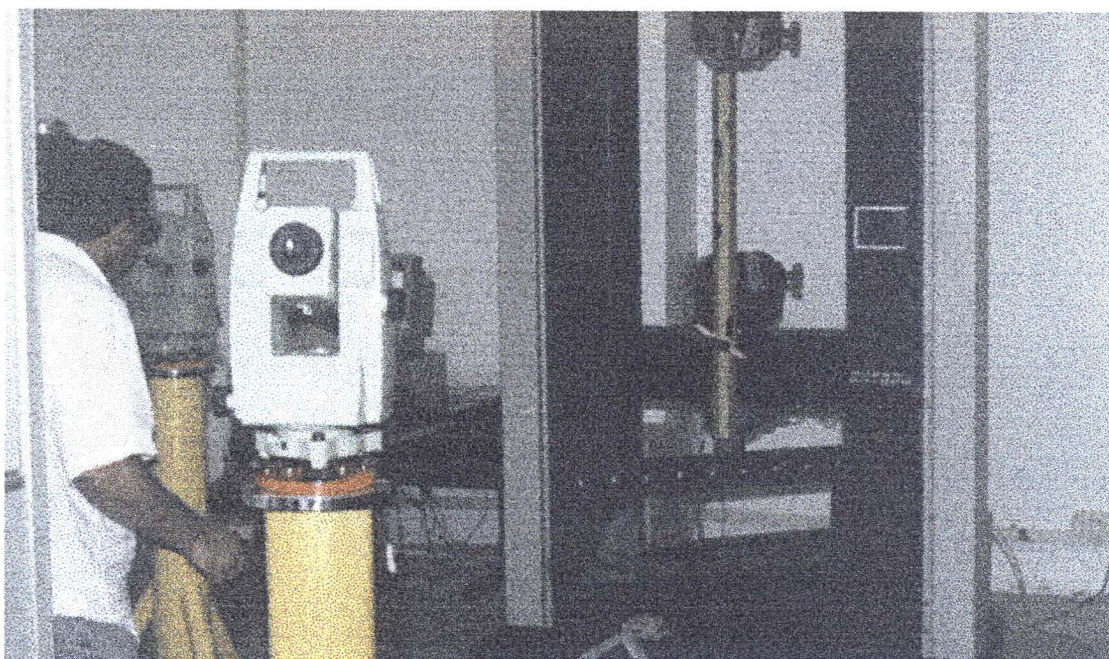


Seção transversal da viga ensaiada

Figura 5.3 Esquema e dimensões em metros da viga de aço ensaiada.



Fotografia 5.1 Disposição das estações totais e dos sensores térmicos durante o levantamento no LAME.



Fotografia 5.2 Disposição das estações totais em relação a viga de aço ensaiada.

O ensaio foi conduzido de forma a se trabalhar na parte linear do diagrama força por deformação. Não se teve a intenção neste trabalho pelo rompimento da viga, mas antes determinar os deslocamentos causados pela aplicação de cargas sucessivas.

A prensa hidráulica marca EMIC modelo DL30000N está localizada no pavilhão principal de ensaios do LAME, dentro de uma pequena sala isolada.

Devido a localização da prensa no LAME, e das pequenas dimensões da sala onde esta se encontra, e o espaço interno do pórtico de sustentação do macaco hidráulico, a viga foi posicionada para ensaio inclinada em relação ao pórtico. A pré-análise do levantamento mostrou ser possível a obtenção das coordenadas de um ponto da viga com precisão melhor que $55\mu\text{m}$.

Foram utilizadas duas estações totais Leica TC 305, cedidas pela Empresa Manfra & Cia Ltda. As estações foram colocadas como mostrado nas fotografias 5.1 e 5.2, também foram utilizados sensores térmicos como instrumentos auxiliares, para determinação das variações térmicas do ambiente. Ainda, como instrumento auxiliar foi utilizado no ensaio um nível geodésico de alta precisão NI003. Foram colados alvos nas proximidades da linha neutra da viga espaçados de 10cm como se mostra a fotografia 5.3. O ensaio foi efetivado com 17 carregamentos iniciando-se com uma carga de 1471 N e finalizando-se o ensaio com uma carga de 50995 N.

O procedimento observacional adotado consistiu nas seguintes etapas:

- a) determinou-se a distância entre os centros ópticos das estações totais utilizadas;
- b) mediu-se as direções horizontais e verticais aos dez alvos colados na viga em posição direta e invertida da luneta com cada uma das estações totais;
- c) mediu-se a variação térmica ambiental durante todo o ensaio com os sensores térmicos eletrônicos;
- d) fixou-se uma régua centimetrada de invar no pistão da prensa efetuando-se nivelamento geométrico de seu deslocamento;

Os resultados podem ser analisados a partir dos deslocamentos tridimensionais dos pontos em relação a posição da viga sem carregamento, ou seja somente sujeita a seu peso próprio.

O sistema de coordenadas adotado para representar os deslocamentos dos pontos ensaiados foi obtido a partir de translações em relação ao sistema instrumental sendo adotado como origem o alvo 1 fixado na viga sem carregamento.

Foi possível a determinação de deslocamentos relacionados a pequenas mudanças nos carregamentos.



Fotografia 5.3 Detalhe da viga de aço sendo ensaiada.

Os resultados de cada carregamento estão sintetizados nos quadros 5.4, foram efetivados os testes estatísticos propostos no Capítulo IV sendo aceita as hipóteses básicas.

Pode-se calcular os vetores de deslocamentos de cada ponto e seus cosenos diretores a partir das coordenadas ajustadas dos pontos. Uma das grandes vantagens de aplicar esse método aos ensaios de viga foi a detecção de deslocamentos nos apoios o que pode modificar os parâmetros determinados a partir do ensaio. Geralmente a prensa monitora o deslocamento do pistão de compressão sem levar em conta os deslocamentos diferenciais. Esses resultados podem ser considerados significativos no cálculo do módulo de elasticidade do material.

O problema foi escolhido pois apresenta solução direta pode ser obtida de expressões bem conhecidas da resistência dos materiais para deformações de vigas, sendo para uma viga simplesmente apoiada (entre apoios) a flecha máxima dada por:

$$\delta = -\frac{PL^3}{48EI_y}$$

e a equação da linha elástica é fornecida pela equação:

$$y = \frac{P}{48EI_y}(4x^3 - 3L^2x) \quad \text{para} \quad x \leq \frac{L}{2}$$

Nestas equações E é o módulo de elasticidade do aço cujo valor usual é igual a:

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Onde: P é a carga e L o comprimento da viga, o diagrama para as demais seções da viga pode ser obtido para cada seção ensaiada.

O momento de inércia fornecido para o perfil C utilizado é:

$$I_y = 0,360 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Foi possível, a comparação entre o valor teórico e o observado. Os resultados das observações efetivadas foram organizados no quadro 5.4, sendo que as colunas são função da carga aplicada na prensa, e para cada ponto da viga fornecem as coordenadas x,y,z em metros.

Quadro 5.4 - Resultados das observações à viga de aço (parte 1)

1) Viga sem carga

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107522	0,061824	0,008714
2	0,1001	0,159915	0,010307
3	0,092667	0,258766	0,010498
4	0,085085	0,358673	0,010722
5	0,077324	0,459463	0,011104
6	0,070083	0,558831	0,010473
7	0,063234	0,658547	0,014279
8	0,056101	0,758837	0,01405
9	0,049249	0,856536	0,015906
10	0,042321	0,955551	0,017801

2) carga de 1471N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107225	0,061902	0,008776
2	0,099867	0,159916	0,010442
3	0,092357	0,258844	0,010582
4	0,084726	0,358828	0,010734
5	0,077021	0,459589	0,011126
6	0,069843	0,558855	0,010594
7	0,062766	0,658709	0,014321
8	0,055599	0,758945	0,014152
9	0,04889	0,856463	0,016117
10	0,041667	0,955663	0,018011

3) carga de 2942N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107343	0,061844	0,008747
2	0,099911	0,159977	0,010259
3	0,092446	0,258883	0,010323
4	0,084905	0,358828	0,010414
5	0,0773	0,459601	0,010762
6	0,070172	0,558934	0,010203
7	0,06307	0,658735	0,013967
8	0,055805	0,758994	0,013824
9	0,04899	0,856575	0,015841
10	0,041582	0,955862	0,017799

4) carga de 4413 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107144	0,06196	0,008633
2	0,099867	0,160021	0,010166
3	0,092375	0,258976	0,010188
4	0,084766	0,358996	0,010213
5	0,077254	0,459688	0,010572
6	0,070268	0,558932	0,010063
7	0,062844	0,658981	0,013722
8	0,055827	0,759018	0,013721
9	0,048926	0,85663	0,015738
10	0,041731	0,955794	0,017777

5) carga de 5884 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,106941	0,062148	0,008475
2	0,099726	0,160182	0,010044
3	0,092247	0,259148	0,010022
4	0,084682	0,359134	0,010038
5	0,077235	0,459859	0,010326
6	0,070017	0,559282	0,009761
7	0,062812	0,659134	0,013544
8	0,055748	0,759217	0,013556
9	0,048598	0,857111	0,015516
10	0,041536	0,956093	0,017609

6) carga de 7845 N

ponto	xa(m)	Ya(m)	za(m)
1	0,107007	0,062049	0,008464
2	0,099726	0,160182	0,00996
3	0,092291	0,259168	0,009906
4	0,084715	0,359143	0,009916
5	0,077196	0,45988	0,010199
6	0,070156	0,559199	0,009596
7	0,062791	0,659175	0,013333
8	0,055573	0,759441	0,01334
9	0,048705	0,857017	0,015391
10	0,041423	0,95626	0,017457

Quadro 5.4 - Resultados das observações à viga de aço (parte 2)**7) carga de 9807 N**

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107294	0,062038	0,008508
2	0,099839	0,160244	0,009869
3	0,092342	0,259225	0,009782
4	0,084865	0,359115	0,009802
5	0,077326	0,459852	0,010039
6	0,070199	0,559284	0,009428
7	0,062933	0,659161	0,013228
8	0,05588	0,759306	0,013299
9	0,048953	0,856975	0,015359
10	0,041748	0,956138	0,017486

8) carga de 11768 N

ponto	xa(m)	Ya(m)	za(m)
1	0,10725	0,062096	0,008385
2	0,099958	0,160181	0,009825
3	0,092507	0,259111	0,009704
4	0,084992	0,359074	0,009641
5	0,077436	0,459834	0,00986
6	0,070294	0,559291	0,00921
7	0,063034	0,659164	0,013032
8	0,055964	0,75925	0,013129
9	0,049134	0,856818	0,015268
10	0,041791	0,956095	0,017396

9) carga de 15691 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107619	0,061964	0,008444
2	0,100306	0,160078	0,009788
3	0,092728	0,259102	0,009556
4	0,085227	0,359044	0,009499
5	0,077716	0,459827	0,00962
6	0,070723	0,559145	0,009021
7	0,063339	0,659066	0,012847
8	0,056202	0,759268	0,012974
9	0,04923	0,856873	0,015137
10	0,042177	0,955876	0,017412

10) carga de 19613 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107581	0,062066	0,008362
2	0,100353	0,16013	0,009674
3	0,092836	0,259124	0,009423
4	0,085324	0,359079	0,00924
5	0,077905	0,459757	0,009413
6	0,070736	0,559238	0,008694
7	0,063399	0,659133	0,012529
8	0,056224	0,759293	0,012755
9	0,049313	0,856916	0,015038
10	0,042057	0,956089	0,017244

11) carga de 23536 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107802	0,061949	0,008406
2	0,100438	0,160131	0,009608
3	0,093102	0,258993	0,009354
4	0,08558	0,358979	0,009095
5	0,078038	0,45978	0,009161
6	0,070986	0,559208	0,008469
7	0,063592	0,659077	0,012347
8	0,056469	0,759218	0,012545
9	0,049492	0,856872	0,014901
10	0,04221	0,956051	0,017244

12) carga de 27459 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107859	0,061917	0,008404
2	0,100693	0,159974	0,009616
3	0,093239	0,258926	0,009236
4	0,085583	0,359011	0,008881
5	0,07814	0,459749	0,008932
6	0,071155	0,559088	0,008188
7	0,063704	0,659054	0,012079
8	0,056605	0,759127	0,012442
9	0,049657	0,856797	0,01481
10	0,042347	0,955972	0,017166

Quadro 5.4 - Resultados das observações à viga de aço (parte 3)

13) carga de 31381 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107888	0,061999	0,008327
2	0,100664	0,160125	0,00948
3	0,093298	0,259021	0,009084
4	0,085695	0,359055	0,008682
5	0,078178	0,459896	0,008608
6	0,071123	0,559318	0,007863
7	0,063896	0,659056	0,011886
8	0,056726	0,759213	0,012218
9	0,049756	0,85689	0,01464
10	0,042432	0,956077	0,017117

14) carga de 35304 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,108036	0,061999	0,008356
2	0,100763	0,160103	0,009419
3	0,093381	0,259047	0,008931
4	0,08574	0,359195	0,00842
5	0,078402	0,459823	0,008379
6	0,071335	0,559274	0,007574
7	0,063894	0,659208	0,01157
8	0,056835	0,759239	0,01199
9	0,049935	0,856846	0,014523
10	0,042603	0,956088	0,017024

15) carga de 39227 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,107993	0,062096	0,008256
2	0,100606	0,160321	0,0092
3	0,093317	0,25922	0,008683
4	0,085778	0,359269	0,008158
5	0,07842	0,45991	0,00803
6	0,071307	0,559419	0,007157
7	0,064026	0,65922	0,011188
8	0,05685	0,759375	0,011687
9	0,049852	0,857096	0,014249
10	0,042593	0,95621	0,016888

16) carga de 43149 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,108209	0,062075	0,008299
2	0,100918	0,160259	0,009247
3	0,093574	0,25916	0,008585
4	0,086073	0,359139	0,008007
5	0,078551	0,460022	0,007705
6	0,071718	0,559247	0,006894
7	0,064299	0,65917	0,01099
8	0,057024	0,759426	0,011499
9	0,050055	0,857066	0,014169
10	0,042837	0,956116	0,016886

17) carga de 47072 N

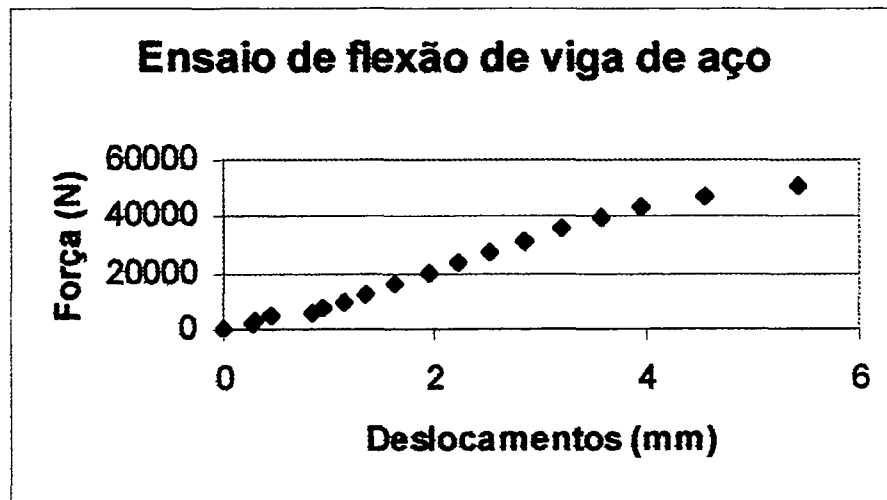
ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,108192	0,062161	0,008273
2	0,101079	0,160266	0,009125
3	0,093729	0,259192	0,008357
4	0,086206	0,359215	0,007622
5	0,078763	0,459983	0,007255
6	0,071873	0,559374	0,00633
7	0,064379	0,659338	0,010475
8	0,057167	0,759526	0,011095
9	0,050248	0,857062	0,013884
10	0,042948	0,956233	0,016743

18) carga de 50995 N

ponto	xa(m)	ya(m)	za(m)
1	0,108665	0,062086	0,008293
2	0,101551	0,160211	0,008979
3	0,094249	0,259185	0,008067
4	0,086799	0,359185	0,007182
5	0,079506	0,459787	0,006745
6	0,072573	0,559158	0,005664
7	0,065048	0,659199	0,009884
8	0,057922	0,759308	0,010714
9	0,050884	0,856881	0,013658
10	0,043685	0,955914	0,016681

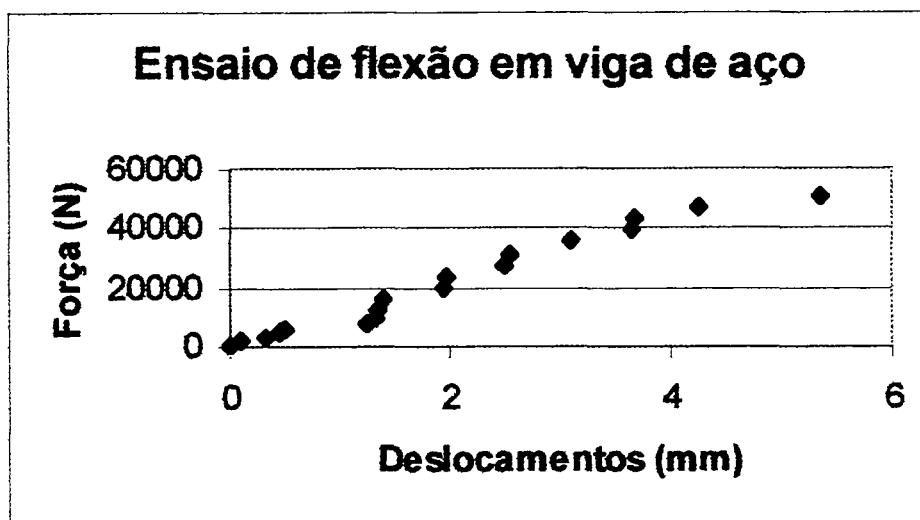
Com os valores das coordenadas foi possível o cálculo da flecha máxima da viga, que permite a construção do diagrama força por deslocamento apresentado no gráfico 5.5.

Gráfico 5.6 Resultado do ensaio de flexão da viga de aço utilizando o STPI



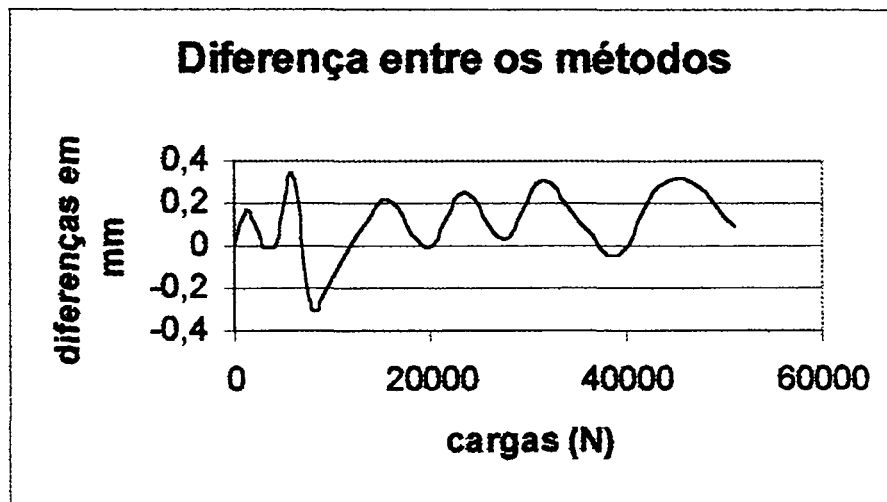
A utilização do nível geodésico NI003, permitiu a medida única e exclusivamente da flecha máxima, seus resultados estão indicados no gráfico 5.6.

Gráfico 5.7 Resultado do ensaio de flexão da viga de aço utilizando o nível NI003



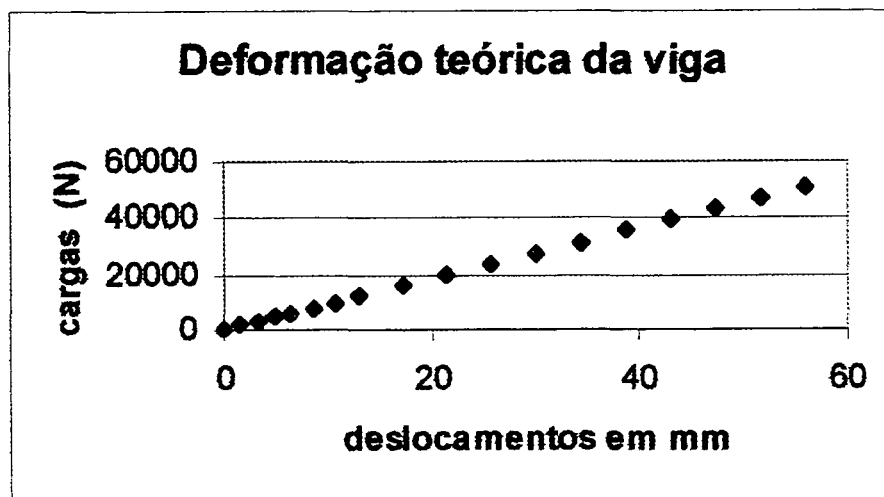
Nota-se que há concordância nestes resultados pela utilização dos dois métodos, as diferenças entre ambos podem ser visualizadas no gráfico 5.7.

Gráfico 5.8 Diferenças entre a utilização do STPI e do nível NI003.



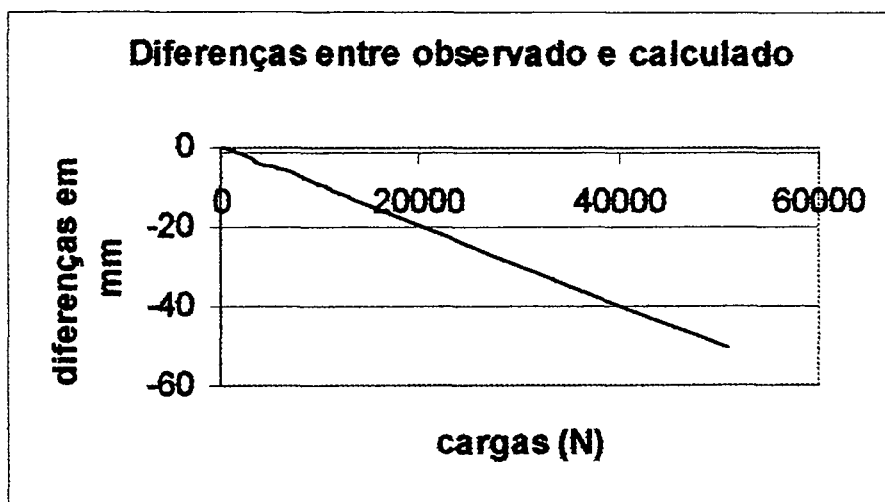
Utilizando-se as equações da resistência do materiais, obtém-se para o diagrama carga por deformação, representado no gráfico 5.8:

Gráfico 5.9 – Valores teóricos calculados



As diferenças entre os valores teóricos e os valores observados pode ser visualizado no gráfico a seguir.

Gráfico 5.10 – Diferença entre os valores observados dos deslocamentos e os valores teóricos



Parte desta discordância pode ser explicada pela aplicação de um modelo simplificado da Resistência dos Materiais, parte pela utilização de um valor médio para o módulo de elasticidade, mesmo assim a concordância ocorre abaixo do milímetro.

O resultado do ensaio emitido pelo Lame é mostrado na figura 5.4, nota-se a concordância do laudo com os resultados obtidos nas medições.

linha neutra não se interceptam o que pode indicar um deslocamento nos apoios durante os ensaios.

Gráfico 5.11 Comparações entre os deslocamentos nos pontos com a viga sem carga e com carregamento de 50995 N.

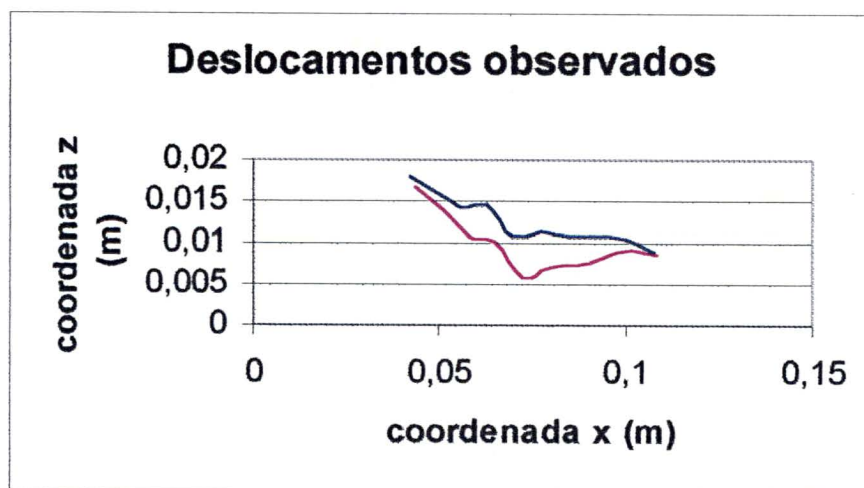
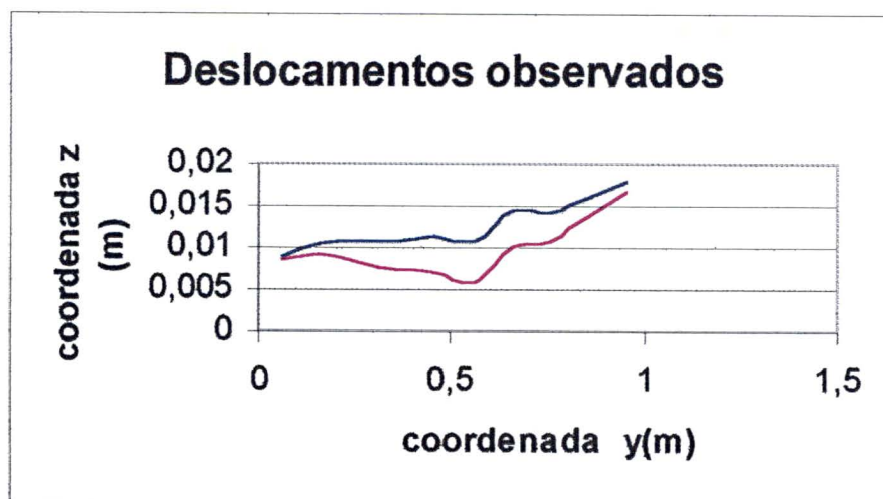


Gráfico 5.12 Comparação entre os deslocamentos nos pontos observados com a viga sem e com carregamento de 50995 N.



CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos e testes desenvolvidos neste trabalho tornaram possíveis a elaboração de conclusões, sugestões e recomendações sobre Topografia Industrial.

6.1 QUANTO AOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA UTILIZADOS

Os sistemas utilizados devem sofrer algumas simplificações quando de aplicações específicas, principalmente quando o objetivo é a determinação de movimentos e dimensões de peças de tamanhos reduzidos, neste caso deve-se fixar um sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais ortogonais na própria peça. Os erros oriundos das considerações da forma da Terra nestes objetos são negligenciáveis quando comparados com as precisões obtidas.

Em trabalhos de monitoramento de grandes estruturas, de peças sujeitas a grandes esforços, e outros, é interessante empregar-se um sistema de coordenadas do tipo CTS, como por exemplo o SIRGAS no caso brasileiro, uma vez que este sistema considerará os deslocamentos crustais locais e tem precisão compatível com este tipo de trabalho.

6.2 QUANTO A TOPOGRAFIA INDUSTRIAL

Os trabalhos de topografia industrial são múltiplos, e a técnica aqui desenvolvida deve ser encarada como uma parte da metrologia. Do ponto de vista metrológico, deve-se desenvolver esta área com vistas a se trabalhar com acurácias da ordem do milímetro ou melhor. Para que isto seja possível é importante salientar a necessidade da calibração instrumental, como por exemplo, o realizado com o alvo padrão (quadro 3.3) e mira horizontal de invar (quadro

3.4). Não se admite o desenvolvimento desta área sem que a mesma seja associada de forma total com a calibração instrumental, principalmente no que tange a determinação da qualidade do instrumental utilizado.

6.3 QUANTO AO DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS E INSTRUMENTOS .

Na Topografia Industrial é urgente o desenvolvimento de instrumentos, métodos e acessórios instrumentais que permitam o desenvolvimento da área. Uma das colaborações deste trabalho consistiu no desenvolvimento de tripés industriais, alvos e metodologia.

Quanto aos métodos de análise de dados, reside nestes um grande filão para o desenvolvimento científico, principalmente na análise de erros, no ajustamento de observações, na geração de modelos matemáticos e na modelagem em geral dos problemas envolvidos.

6.4 QUANTO AO MÉTODO DA INTERSEÇÃO ÓPTICA TRIDIMENSIONAL.

O método proposto pode ser utilizado em qualquer problema da Topografia, uma vez que é genérico. Se aplicado com olhares da micro Geodésia, isto é, encarado sob o ponto de vista de que a Topografia é um caso particular da Geodésia, o método sofre um revestimento matemático e físico que além de interessante sofre algumas considerações conceituais importantes. Por exemplo, a discussão sobre a introdução do desvio da vertical num levantamento em região restrita da Terra.

Cabe aqui algumas considerações sobre os resultados obtidos, no emprego do método suas vantagens e desvantagens. O método tem como principal

vantagem sua facilidade conceptual, porém apresenta como desvantagem primeira a exigência de duas estações totais ou dois teodolitos eletrônicos, e como consequência a necessidade de pelo menos dois operadores experientes para as observações. No ajustamento dos dados aparecem alguns problemas com a redundância dos dados, principalmente no caso deste trabalho onde sempre foram utilizados dois instrumentos. Neste caso, ocorre que a solução dos mínimos quadrados esbarra em matrizes cujos determinantes se aproximam muito de zero, exigindo soluções dos sistemas com a utilização de inversas generalizadas.

6.5 QUANTO AOS EXPERIMENTOS.

Os experimentos desenvolvidos demonstram algumas características de vantagem de aplicação da metodologia na prática. Assim por exemplo foi possível demonstrar que a precisão do método é da ordem de $\pm 50\mu\text{m}$, o que o torna muito competitivo em metrologia industrial.

Especificamente falando, os resultados com o experimento na viga de aço do LAME, mostrou que um trabalho com visão metrológica pode mudar sobremaneira o enfoque de um trabalho consagrado. A detecção da movimentação dos apoios durante o ensaio, merecerá um estudo em conjunto com aquele laboratório no sentido de se detectar as implicações deste fato na determinação do módulo de elasticidade e no módulo de Young dos materiais.

6.6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES.

Além dos aspectos abordados no trabalho, efetua-se as seguintes recomendações e sugestões:

- que o Projeto Topografia Industrial continue no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas associado ao Projeto Laboratório de Aferição de forma vinculada e integrada;

- que seja desenvolvida na sequência a coleta e análise dos dados em tempo real, numa tendência normal e natural da Geodésia;

- que os testes com dimensões de produto sejam desenvolvidos, principalmente no que tange a determinação da forma de pequenos objetos, com a utilização de métodos de regressões e com desenho em tempo real, o que acarretará em aplicações industriais relevantes no conceito de produtividade;

- que se desenvolvam novos instrumentos principalmente no que concerne a determinação experimental de erros sistemáticos ou de seus resíduos, como é o caso do resíduo da inclinação do limbo horizontal que pode ser determinado com um banho de mercúrio nadiral;

- que se desenvolvam equipamentos ópticos que permitam a auto-colimação instrumental com grande precisão;

- que se desenvolvam novos alvos industriais, de baixo custo, que permitam a medida eletrônica de distância com alta precisão;

- que se crie da linha de pesquisa em parametrização dos erros instrumentais, através da modelagem das fontes de erros, e a conseqüente discriminação dos erros individuais, bem como a determinação das constantes internas dos instrumentos;

Pretende-se dar continuidade a este trabalho, tendo em vista que não há expectativa do autor quanto a sua finalização, por se mostrar promissor quanto ao desenvolvimento de tecnologia na Universidade Federal do Paraná, numa área de grande aplicabilidade e futuro que é a Topografia Industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ABNT. **NBR 13133 – Execução de levantamento topográfico: procedimento.**

Rio de Janeiro, maio 1994.

ABNT. **NBR 14166 – Rede de referência cadastral municipal.** Rio de Janeiro, 1998.

ALLAN, A. L. Back to basics(3) Surveying in three dimensions. *Surveying Review*. Vol 33. 1996 p. 454-460.

ALLAN, A. L. The principles of Theodolite Intersection Systems *Surveying Review*. Vol 29. 1988 p. 226-234.

ASHKENAZI, V. Criteria for strength analysis and optimisation terrestrial triangulation networks. **International Symposium Satellite and Terrestrial Triangulation, Graz**, v.1,1972.

BOMFORD, G. **Geodesy**. 4ed., Oxford University Press, 1983.

BOUCHER, C. Definition and realization of terrestrial reference systems for monitoring earth rotation. *Geophysical Monograph*, p 197-201, 1990.

BRUNNER, F.K. **Geodetic Refraction**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1984.

CAMACHO, A.G. Tridimensional Adjustment with inner constraints in small control networks. *Survey Review*. vol 29. 1988. p371-382.

CHAUVENET, W. **Manual of Spherical and Practical Astronomy**. Philaelphia: J.B. Lippincott & Co. London: Trübner & Co. vol. I., 1876.

CROCETTO, N.; RUSSO P. Deflection of the vertical and refraction in three-dimensional adjustment of terrestrial networks. *Journal of Geodesy*. vol 70. 1996. p.681-695

CHYZANOWSKI, A. Design and error analysis of surveying Projects. *Select Papers and lecture notes*. University of New Brunswick. 1977.60p.

DING X.; COLEMAN R. Adjustament of precision metrology networks in three dimension. *Survey Review*, p 305-315, 33, 1996.

- DOUBEK, A; GEMAEL, C. Auscultação Geodésica da região da Barragem Bento Munhoz da Rocha. *Boletim da UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas*, n° 28, 1982, 27p.
- GARNÉS, S.J.A . Sistema de Projeção de Orientação de Plantas Topográficas. **Anais do XI COBRAC**, 1998, p50-67.
- GEMAEL, C. **Introdução à geodésia geométrica - Parte I**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPr. 120p, 1977.
- GEMAEL, C. **Referenciais Cartesianos utilizados em Geodésia**. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. UFPr., 1981.
- GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações**. Editora UFPR. 320p. 1994
- HARVEY, B.R.; RÜEGGER, J.M. Theodolite Observations and Least Squares. *The Australian Surveyor*, vol 37, n° 2, 1992. p. 120-128.
- HORNE, D. F. **Measuring System and Transducers for Industrial Applications**, Adam Hilger, 1990.
- HRADILEK L. Optimization of three-dimensional terrestrial networks. *Studia Geophisics et Geodetica*. V 19, 1975, p.210-216.
- IAG- International Association of Geodesy séries 108 – **Applications of Geodesy to Engineering**. Springer-Verlag, 1991, 431p.
- IAG- International Association of Geodesy séries 121 – **Geodesy beyond 2000 –The Challenges of the First Decade**, Springer – Verlag, 1999, 445p.
- IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em Território Brasileiro**. RPR n° 22/83, Boletim de Serviço 1602 (Suplemento), Rio de Janeiro, 1983.
- KOVALEVSKY, J.; MUELLER , I. I. **Comments on conventional terrestrial and quasi-inertial reference systems. Reference Coordinate Systems for Earth Dynamics**. E.M. Gaposchkin and B. Kotaczek. p 375-384, 1981.

- LEICA **Manual da Estação Total TC 403L**. Rio de Janeiro, 1998.
- MACHADO, J.A.M. Controle de Deslocamentos através de processos topográficos – tecnologias recentes. *Cartografia e Cadastro*, nº 05., 1996 p.17-30.
- MEDINA, A S. **Classificação de Teodolitos e Estações Totais na UFPr**. Dissertação de Mestrado. UFPr, 1998, 108p.
- MÜLLER, R. **Compendio General de Topografia Téorico, Prática**. 4ed. Buenos Aires. 1944-52. 5v.
- NADAL, C. A, Metodologias Aplicadas no controle e monitoramento de subsidências no acidente geotécnico ocorrido em Almirante Tamandaré. **Anais do Seminário Luso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Lisboa**, v. 1, 1995, p.50-58.
- NADAL, C. A Protótipo de um alvo para topografia industrial. *Cartografia e Cadastro* nº 9, 1998, p.69-72.
- NADAL, C. A; MORAES C.V. Análise de erros em medição de direção angular. **Anais do X Congresso Brasileiro de Agrimensura**, Crisciúma, v.1, p.65-71, 1999.
- OLLIVIER, F. **Instruments Topographiques**. Paris: Ed. Eypolles, 1955. 809p.
- PATTERSON, R.C. Direction Reduction and the Global Model Test. *Australian Journal of Geodesy Photogrametry and Survey*, 48, 1988. 69-104
- RICHARDUS, P. **Project Surveying**. 2nd ed. ^{aa} Balkema, Rotterdam, Sect. 14.2, 1984, p. 186-195.
- ROSA Fº, E.F.; SOUZA E.L.C.; GIUSTI, D.A. ; MONSTIER M.S.; NADAL C. A ; Estudos preliminares sobre às águas freáticas de Paranaguá – Pr. *Boletim Paranaense de Geociências*. N 45, 1997, p.35-41.
- SILVA, I. Topografia Industrial. *Infogeo*. Ano2 nº 6, 1999. p. 24-26.
- XIANJIN, P. Optimization of the configuration of *Engineering Australian Journal of Geodesy, Photogrametry and Surveying*. n. 52. june 1990. p21-30.

XIAOLI, D.; COLEMAN R. Adjustment of precision metrology networks in three dimension. *Survey Review*, 33. 1996. p 305- 315.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ADICIONAIS

Tendo em vista, o rápido desenvolvimento das ciências geodésicas como um todo, em particular a área de levantamentos, e o advento desta nova ferramenta de trabalho, que é a rede de computadores INTERNET, estamos fornecendo neste trabalho, os principais endereços relacionados com o mesmo, os quais são, atualizados com o passar do tempo.

1) Sobre equipamentos:

nome do site	endereço	objetivo
Survey Instruments Bookstore	http://www.guideme.com/Bookstores	Características técnicas de instrumentos
ASAHI PRECISION CO., LTD.	http://www.pentax.co.jp	Características técnicas de instrumentos
Leica LSG-Service	http://www.leica.com	Características técnicas de instrumentos
alezi teodolini / hezolinem	http://www.hezolinem.com	Características técnicas de instrumentos
Florida Level & Transit (tm) –Surveying and Engineering Equipment and Software	http://www.fltinc.com	Características técnicas de instrumentos
MicroSurvey Products	http://www.microsurvey.com	Produtos sobre o assunto
GN385 Survey Project IC: Instrument Field Test and Calibration	http://www.acru.uq.oz.au	Testes com instrumentos

2) Sobre publicações na área:

nome do site	endereço	Objetivo
Geodésia online	http://www.rio.com.br	Geodésia no Brasil
Department of Applied and Engineering Geodesy	http://info.tuwien.ac.at	Principais referências bibliográficas no assunto
Land Surveying and Geomatics: Publications	http://homepage.interaccess.com	Referências bibliográficas
Professional Surveyor Magazine Online	http://www.profsurv.com	Bibliografia sobre ações profissionais
Home Page do Laboratório de Topografia e Geodésia	http://geodesia.ptr.usp.br	Referência brasileira no assunto
Land Surveyor Reference Page	http://www.lsrp.com	Referências bibliográficas
UFPR-Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas	http://ufpr.br/geoc/	Trabalhos publicados pelo autor.